



USAID | **MÉXICO**
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

MEXICO LOW EMISSIONS DEVELOPMENT PROGRAM (MLED).

CONTRACT: AID-523-C-11-00001

MARZO 2014

Este informe fue elaborado por Tetra Tech ES Inc. para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.

AVISO LEGAL

Las opiniones expresadas en esta publicación no reflejan necesariamente la opinión de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional ni la del Gobierno de los Estados Unidos.

www.mledprogram.org

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

El presente estudio fue elaborado por el COLEGIO DE INGENIEROS AMBIENTALES DE MÉXICO, A.C. Los autores son (M. en C. Luis R. Sánchez Cataño, M. en C. Alma Lucía García Hernández, Ing. Alberto Cruzado Martínez, Ing. Lourdes Cázares Chávez, Ing. Christian Marie Contreras Juárez Y Mat. Jorge Martínez Castillejos,), en el marco del Programa para el Desarrollo Bajo en Emisiones de México (MLED), patrocinado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), bajo el contrato “AID-523-C-11-00001” implementado por Tetra Tech ES Inc.

Para mayor información, por favor contacte a: info@mledprogram.org

www.mledprogram.org

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

Tabla de contenido

1.	Introducción	7
1.1.	Transición energética en México	7
1.2.	Externalidades ambientales	9
1.3.	Marco Regulatorio	12
1.4.	Grupo de trabajo de metodología de externalidades	13
2.	Antecedentes	16
3.	Aplicación de la metodología <i>ExternE</i>	18
3.1	Impactos ambientales relevantes asociados a las tecnologías evaluadas....	22
3.1.1	Daños a salud por emisiones de contaminantes criterio	23
3.1.2	Contribución a cambio climático	46
3.1.3	Impactos relacionados con energía eólica: impacto visual, emisiones de ruido, colisión de aves y selección del lugar.	53
3.1.4	Impactos relacionados con energía geotérmica.	59
4.	Resultados.....	61
4.1	Resultados: Daños a salud por emisiones atmosféricas.....	61
4.1.1.	Central de Ciclo Combinado Dos Bocas	61
4.1.2	Central de Ciclo Combinado El Saúz	61
4.1.3	Relleno Sanitario San Nicolás	62
4.1.4.	Ingenio Emiliano Zapata.....	63
4.2	Resultados: Cambio climático por emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	66
5.	Conclusiones	69
5.1.	Limitaciones de la metodología y fuentes de información	72
6.	Lista de Anexos.....	74
7.	Bibliografía.....	75

Tabla de acrónimos y abreviaturas.

Altura de mezclado	Se define como la altura máxima atmosférica que se alcanza diariamente debido a la turbulencia, donde se lleva a cabo el proceso de mezclado de los contaminantes.
CARB	California Air Resources Board – Consejo del Aire de California.
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
CER	Certificated Emissions Reduction – Certificado de Reducción de Emision que equivale a 1 ton CO ₂ equivalente.
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
CH ₄	Metano.
Clase Pasquill	Clasificación que caracteriza los diferentes niveles de estabilidad atmosférica.
cm/s	Centímetro por segundo.
CO	Monóxido de Carbono.
CO _{2eq}	Dióxido de Carbono Equivalente - Es la cantidad de emisiones de CO ₂ que causarían el mismo forzamiento radiativo que la cantidad emitida de un gas de efecto invernadero bien mezclado o una mezcla de gases de efecto invernadero bien mezclados, todo multiplicado con su respectivo potencial de calentamiento mundial (PCM) para tener en cuenta los diferentes tiempos de permanencia en la atmósfera.
CO ₂	Dióxido de Carbono.
COA	Cédula de Operación Anual- Mecanismo de reporte relativo a las emisiones, transferencias y manejo de contaminantes, el cual es presentado por establecimiento industrial, para facilitar su seguimiento por parte de la autoridad ambiental.
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles.
DGGCARETC	Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (SEMARNAT).
Ecosense	Modelo integrado de dispersion atmosférica y evaluación de exposición que implementa el enfoque impacto-vía desarrollado como parte de la metodología ExternE.
EMEP	Environmental Monitoring and Evaluation Programme – Programa de Monitoreo y Evaluación Ambiental.
ENTEAS	Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

EUA	European Union Allowances – permisos equivalentes a la emisión de 1 tonelada de CO ₂ equivalente a través del Protocolo de Kioto.
Eurostat	Departamento de Estadística de la Unión Europea.
ExternE	External Costs of Energy – Metodología para Evaluar los Costos Externos de la Energía.
FE	Factor de Emisión.
FER	Función Exposición-Respuesta.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
H ₂ S	Ácido Sulhídrico.
HCT	Hidrocarburos Totales.
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
INIFAP Pecuarias.	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
K	Kelvin o Grado Kelvin.
KWh	Kilowatt-hora.
LAERFTE	Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.
m	Metro(s).
m ³	Metros cúbicos.
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio – Proyectos de Mitigación de Emisiones de GEI operados a través del Protocolo de Kioto.
MMm ³	Millones de metros cúbicos.
Morbilidad	Cantidad de individuos que son considerados enfermos o que son víctimas de enfermedad en un espacio y tiempo determinados.
Mton	Megatón o Megatonelada equivale a 1×10 ⁶ toneladas.
MW	Megawatt.
MWh	Megawatt-hora.
N ₂ O	Óxido Nitroso.
NO _x	Óxidos de Nitrógeno.
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
PCG	Potencial de Calentamiento Global.

PIB	Producto Interno Bruto.
PM ₁₀	Partículas con diámetro menor a 10 µg (PM ₁₀).
PPA	Paridad del poder adquisitivo - Suma final de cantidades de bienes y servicios producidos en un país, a valor monetario de un país de referencia.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
SENER	Secretaría de Energía.
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
SIMFACTS	Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation – Enfoque Simplificado para la Estimación de Impactos de la Generación de Electricidad.
SMN	Servicio Meteorológico Nacional.
SO ₂	Dióxido de Azufre.
SS	Secretaría de Salud.
t	Tonelada.
UAA	Universidad Autónoma de Aguascalientes.
UE	Unión Europea.
US AID Internacional.	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

1. Introducción

En el presente informe se presentan los resultados del trabajo de cuantificación de externalidades ambientales de la generación de energía eléctrica en México, realizado para la Dirección General de Sustentabilidad de la Subsecretaría de Planeación y Transición Energética de la SENER, conforme a lo establecido en el contrato por Tetra Tech, USAID y para dar cumplimiento a lo establecido en la **Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE)** y su reglamento en torno a la necesidad de conocer las externalidades ambientales de las diversas tecnologías de generación de energía eléctrica en México con la finalidad de que sean considerados en los procesos de toma de decisión de la expansión del sistema eléctrico nacional, dando mayor soporte y favoreciendo la transición energética hacia las energías renovables.

En primer lugar se describen conceptos clave y se presenta una base documental referente a la metodología a utilizar para cuantificar las externalidades ambientales de la generación de energía eléctrica en México; se incluyen los fundamentos teóricos y jurídicos que dan soporte a la evaluación de externalidades asociadas a la generación de electricidad.

Posteriormente se describen las etapas de la metodología, así como las consideraciones y variables utilizadas en cada una de estas etapas, las cuales fueron suministradas al modelo SIMPACTS para obtener la modelación de la dispersión de contaminantes y la evaluación y monetización de los impactos a salud humana correspondientes para las centrales estudiadas.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos para las seis centrales consideradas en el estudio, las cuales representan energías limpias o renovables como la tecnología de ciclo combinado, el uso de biomasa y biogás así como el uso de energía geotérmica y eólica. A través de las tecnologías de ciclo combinado, geotérmica y eólica se genera aproximadamente un 8% de la energía eléctrica en el país (Ilustración 1). Esta información aporta fundamentos sobre las ventajas no solo ambientales y sociales sino también económicas para que México transite hacia una matriz energética más sustentable.

1.1. Transición energética en México

De acuerdo a información de la SENER (SENER, 2012) actualmente en México aproximadamente un 25% de la energía eléctrica se genera a través de energías renovables, sin embargo de este porcentaje 22% proviene de centrales hidroeléctricas, dejando solo menos de 2% a energía geotermoeléctrica y menos de un 1% a energía

eólica, sin embargo el territorio nacional cuenta con un gran potencial de energía renovable, incluyendo energía eólica, solar, geotérmica, minihidráulica y bioenergía, lo cual permite técnicamente una transición hacia una matriz energética con mayor participación de energías renovables.



Ilustración 1. Generación de energía eléctrica en México Durante el mes de agosto de 2012.

Porcentaje de la capacidad efectiva total instalada en el país.

Basado en: Sistema de Información Energética (SENER, 2012)

Asimismo México ha demostrado su interés y compromiso con el combate al cambio climático por lo que se ha unido a diversos esfuerzos internacionales y al mismo tiempo ha incluido en su política interna elementos que apoyan este compromiso, como lo es la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (SENER, 2011).

La Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (ENTEAS) se formuló con fundamento legal en la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética y en vinculación con la Estrategia Nacional de Energía, el Plan Nacional de Desarrollo y el Programa Sectorial de Energía para impulsar el cumplimiento de los objetivos comunes como lo son la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la quema de combustibles fósiles, la mitigación del impacto ambiental del sector energético, el combate a los efectos del cambio climático y la reducción de la dependencia de los recursos fósiles como fuente primaria de energía

mediante el fomento a la utilización de energías renovables y tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica (SENER, 2011).

Son catalizadores fundamentales de la transición energética los factores económicos, ya que son estos los que marcan las tendencias de mercado, sin embargo también es importante tomar en cuenta factores sociales, políticos y culturales, en especial en el caso de las energías renovables, ya que estas por lo general disminuyen los impactos ambientales, generando beneficios marginales sociales mayores a los beneficios marginales privados lo cual a su vez genera externalidades positivas. Sin embargo, estas externalidades deben ser internalizadas en el costo de la generación de energía con la finalidad de minimizar las fallas de mercado.

1.2. Externalidades ambientales

Cuando los mecanismos de mercado o de coordinación social fallan al no considerar aspectos ambientales, a estas fallas se les considera externalidades. Una externalidad es aquella situación en la cual una parte crea un daño o un beneficio a otra parte sin tomar ninguna atribución o responsabilidad al respecto; estos efectos no tienen precio, son involuntarios y no compensados (*Sundqvist, 2004*).

Las externalidades pueden ser positivas o negativas, y aunque la mayoría de las actividades involucran efectos externos, existen externalidades relevantes que son aquellas en las que la parte afectada desea inducir un cambio de comportamiento en la parte activa, como es el caso de las externalidades de la generación de energía eléctrica en México, debido a que la parte afectada a través del gobierno mexicano desea inducir a la transición energética para lo cual es necesario evaluar dichas externalidades.

En general, las externalidades ambientales originadas por la generación de electricidad, se pueden dividir en dos, aquellas generadas por impactos a nivel regional como los costos por daños a la salud y al medio ambiente por las emisiones de contaminantes y las generadas por impactos a nivel global como los costos ocasionados por el impacto al cambio climático atribuible a las emisiones de gases de efecto invernadero (*Owen, 2006*).

La mayor parte de las externalidades son causadas por efectos a la salud humana, por lo cual estos costos varían en gran medida dependiendo de la ubicación de las plantas generadoras, es por eso que es importante evaluar las externalidades considerando el contexto particular del país o región a estudiar.

Es importante tomar en cuenta que las externalidades no son generadas deliberadamente, sino que más bien son subproductos de algún producto o servicio que

genera beneficios, por lo cual su reducción conlleva un costo que va del costo de dejar de producir ese bien o servicio al costo de imponer soluciones técnicas. Asimismo la reducción de las externalidades genera beneficios al grupo que cargaba la externalidad al principio, sin embargo cuando este grupo es el mismo que utiliza el bien o servicio, la externalidad no se eliminará por completo, sino solo al punto en el que los beneficios marginales de la reducción sean balanceados con el costo marginal de dicha reducción (*Rolfe, 2003*).

Existen varios mecanismos de mercado cuyo objetivo es internalizar las externalidades y mitigar las fallas que ocasionan permitiendo tanto a generadores como a consumidores responder a las señales de precio de manera eficiente y costo-efectiva. Entre los mecanismos que se pueden considerar, existen los impuestos a la energía y los créditos ambientales, sin embargo estos últimos más que internalizar las externalidades subsidian las energías renovables con dinero de los contribuyentes y no en proporción con su consumo de energía pero al mismo tiempo son más aceptables políticamente.

También existen los esquemas de comercio de emisiones como el Protocolo de Kioto, el cual se basa en un régimen de sistema de fijación de límites máximos e intercambio de los derechos de emisión y es considerado como un mecanismo flexible que incentiva la reducción de emisiones con la finalidad de vender los permisos, finalmente se pueden utilizar derechos de propiedad, los cuales imponen estándares mínimos de exposición de contaminantes a la población, otorgando derechos de propiedad a los individuos o grupos que pueden demandar a los actores que contaminan por encima de los estándares citados (*Owen, 2006*).

Los mecanismos a ser utilizados dependerán del contexto social, ambiental, político, y la evaluación de las externalidades servirá como insumo para que los tomadores de decisiones pongan en marcha los mecanismos que mejor se adecuen para balancear el crecimiento económico con la calidad ambiental.

Tabla 1. Ventajas de los mecanismos de mercado para la internalización de externalidades

IMPUESTOS AMBIENTALES	PERMISOS TRANSFERIBLES
Costo efectividad - Los impuestos, derechos o cargos permiten alcanzar los objetivos planteados de la manera más costo-efectiva. En términos técnicos, esto se logra al igualar el cargo o impuesto con	Minimización de costos - Reducen más sus emisiones aquellas empresas donde eso resulta más barato.

<p>los costos marginales de abatimiento.</p> <p>Algunos expertos concluyen que las soluciones de mercado son de 10 a 30 veces más económicas que la instrumentación de políticas de comando y control.</p>	
<p>Ajuste automático - Los niveles de emisión se ajustan automáticamente al impuesto (o precio): aquellos que contaminan disminuyen sus emisiones hasta que el costo marginal de abatir iguala el impuesto. Por encima de este punto, es más económico pagar el impuesto que abatir.</p>	<p>Flexibilidad - Para cambiar el nivel de contaminación, la administración puede aumentar la oferta de certificados o comprar certificados y retirarlos del mercado</p>
<p>Generación de beneficios ambientales y económicos - Por un lado, los impuestos ambientales generan ingresos que pueden tener un destino específico para la conservación o el mantenimiento de los recursos naturales, al tiempo que inciden en el comportamiento y crean incentivos para disminuir el impacto negativo sobre el entorno ambiental.</p>	<p>Precisión: es más fácil alcanzar un nivel de protección ambiental deseado limitando la cantidad de contaminación directamente que usando un impuesto</p>
<p>Integración del aspecto ambiental en las políticas sectoriales - Dado que la política fiscal permea al conjunto de la economía, mediante el cobro de impuestos ambientales se incorporan automáticamente a todos los sectores los costos que generan aquellos que contaminan.</p>	

Como menciona *Fouquet (Fouquet, 2011)*, existe una demanda para la mitigación de gases de efecto invernadero y existen las soluciones de mitigación aunque sean costosas, sin embargo no hay incentivos suficientes para reducir las emisiones, y los daños por el cambio climático aumentan conforme aumentan las emisiones, por lo que las externalidades tienden a aumentar lo que en parte dificulta llegar al punto de balance, por

lo que se debe pensar en el desarrollo de instrumentos que sean ajustables al probable aumento en las externalidades.

1.3. Marco Regulatorio

La evaluación de externalidades es fundamental para conocer el costo integral de la generación de energía eléctrica, lo cual permite tomar decisiones adecuadas en torno al cumplimiento de la reciente reforma (01-06-2011) al artículo 36-bis de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, que establece que *“deberá aprovecharse tanto en el corto como en el largo plazo, la producción de energía eléctrica que resulte de menor costo para la Comisión Federal de Electricidad, considerando para ello las externalidades ambientales para cada tecnología...”*.

Adicionalmente este estudio da soporte a la Ley General de Cambio Climático, en específico a su artículo 32 referente a la política nacional de mitigación de cambio climático al fomentar las capacidades del sector energético considerando el estudio de las consecuencias económicas y sociales del establecimiento de los diversos sistemas de generación energética y analizando el sector energético incluyendo los costos de las externalidades sociales y ambientales, así como los costos de las emisiones en los diferentes sistemas de generación.

Asimismo la adaptación de la metodología Externe al contexto nacional permite dar cumplimiento al artículo 10 de la LAERFTE que establece que es necesario desarrollar “una metodología para valorar las externalidades asociadas con la generación de electricidad, a partir de las diversas fuentes renovables y no renovables en sus distintas escalas”, con la finalidad de diseñar los mecanismos de regulación ambiental para el aprovechamiento de energías renovables más adecuados.

La cuantificación de externalidades también servirá de base para determinar el cálculo de las contraprestaciones que deberán pagar los suministradores a los generadores que usen energías renovables conforme a lo contemplado en el artículo 14 de la LAERFTE.

De acuerdo a los artículos 15 y 16 del reglamento de la LAERFTE, la SENER con la finalidad de determinar los beneficios económicos netos potenciales de la generación de energía renovable considerará las externalidades que deberán ser valoradas a través de la metodología que deberá ser elaborada por la propia SENER y remitida a la SHCP y la SS que en el ámbito de sus competencias revisarán y emitirán sus opiniones previo a su emisión.

1.4. Grupo de trabajo de metodología de externalidades

Para dar cumplimiento a las regulaciones citadas en la sección anterior se formó el grupo de trabajo de metodología de externalidades con participantes de las siguientes dependencias: SENER, SHCP, SEMARNAT, SS, CFE e INECC. Este grupo considera como objetivo establecer la metodología que deberán seguir los suministradores para valorar las externalidades ambientales asociadas con la generación de electricidad en México, para las diversas tecnologías y fuentes de energía utilizadas.

La información de entrada que básicamente es utilizada para el desarrollo de la metodología son los valores unitarios de toneladas de sustancias contaminantes por Megawatt hora, los costos por tonelada de sustancia contaminante y los inventarios de emisiones.

La valoración de las externalidades servirá para (Grupo de trabajo de metodología de externalidades, abril de 2012):

- a) Ser incorporada en la evaluación de impacto de los planes de desarrollo de los proyectos de fuentes renovables de energía que se verá reflejado en los planes de expansión del Sistema Eléctrico Nacional. El costo de las externalidades sería sumado a los costos variables de generación para cada tecnología y combustible para obtener el cálculo de los costos nivelados de los diversos proyectos.



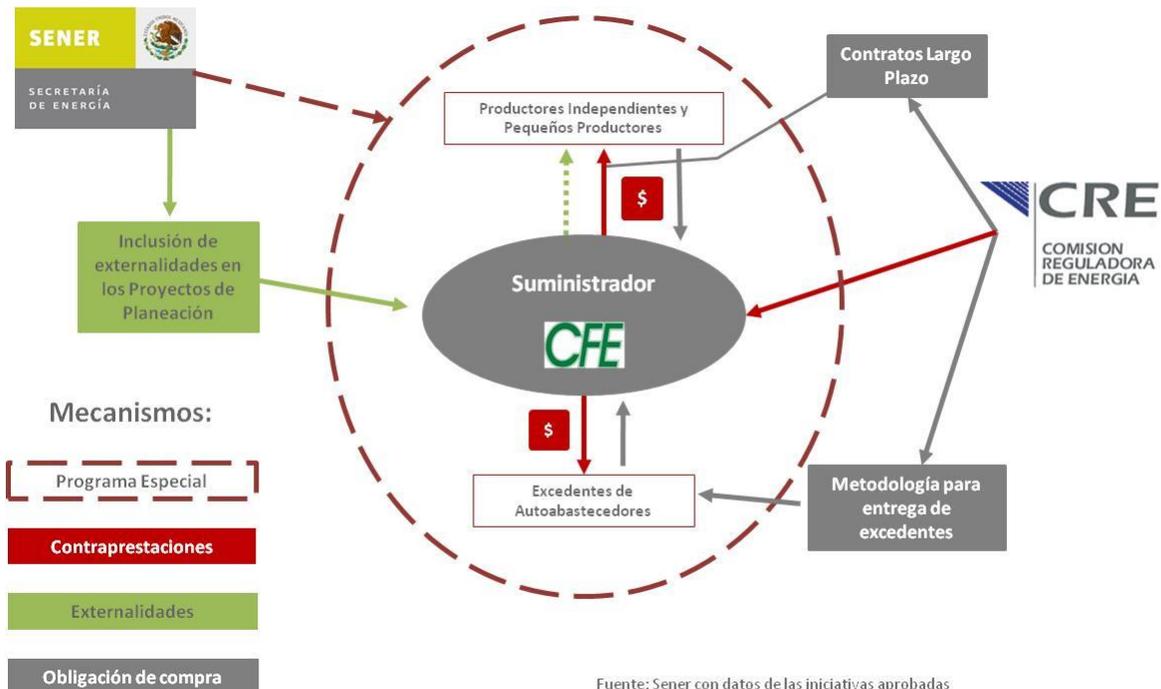
- b) Realizar un análisis costo-beneficio de los proyectos de inversión de los suministradores, en el cual se incluyan como costos las externalidades incrementales y como beneficios las externalidades evitadas y los ingresos provenientes de la venta de bonos de carbono por reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

- c) Asignar y despachar generadores eléctricos al incorporar las externalidades ambientales en las unidades del sector eléctrico como un costo variable para cada tecnología y combustible y por lo tanto el costo total de corto plazo incluirá las externalidades ambientales.



- d) Ser consideradas dentro de las contraprestaciones máximas y mínimas ya que como se explicó en el punto anterior son internalizadas en el costo total de corto plazo.

En general las externalidades ambientales serán incluidas en el nuevo modelo regulatorio para las energías renovables, como se puede observar en la siguiente ilustración:



Fuente: Sener con datos de las iniciativas aprobadas

Ilustración 2. Nuevo modelo regulatorio para las energías renovables

Fuente: (Alcocer, 2011)

2. Antecedentes

En el año 2004, la CEPAL, realizó la primera evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México, como parte de un convenio de colaboración con la SEMARNAT. Esta evaluación fue realizada con la versión simplificada de la metodología vías de impacto del proyecto ExternE de la Unión Europea, así como el modelo SIMPACTS del OIEA.

En dicho estudio se seleccionaron 11 zonas donde se encuentran las 13 mayores plantas termoeléctricas de México, las cuales utilizan como combustible principal combustóleo o carbón. Las localidades estudiadas fueron:

- Río Escondido, Coahuila
- Tuxpan, Veracruz
- Manzanillo, Colima
- Petacalco, Guerrero
- Tula, Hidalgo
- Salamanca, Guanajuato
- Altamira, Tamaulipas
- Puerto Libertad, Sonora
- Mazatlán, Sinaloa
- Rosarito, Baja California
- Samalayuca, Chihuahua

Las localidades de Tula, Salamanca, Altamira, Rosarito y Samalayuca son denominadas como zonas críticas de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, que establece los niveles máximos permisibles de emisiones atmosféricas para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles.

Los datos técnicos, económicos y de salud utilizados en este estudio corresponden al año 2000, entre estos datos se encuentran la información geográfica y meteorológica de cada una de las localidades estudiadas, así como los inventarios de contaminantes y características técnicas de cada una de las centrales objeto del estudio. El alcance de esta evaluación incluyó los impactos por emisiones de SO₂ y NO_x dejando fuera las emisiones “corriente arriba” y de gases de efecto invernadero.

En cuanto a las variables de Incremento de Riesgo Relativo necesarias para estimar los impactos en salud humana, se utilizaron los resultados del meta-análisis del proyecto ECOURS, referencias del propio proyecto ExternE y algunos datos de la OMS.

En cuanto a los datos requeridos para la monetización de los impactos, se utilizaron datos de costos de atención a casos de enfermedad estimados por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), mientras que para los costos asociados a mortalidad, se utilizó el enfoque de años de vida perdidos del proyecto ExternE y el valor europeo fue transferido a las condiciones de México mediante la relación de la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto con respecto al de la UE.

Como resultado principal de este estudio, se determinó que el costo externo ponderado en función de las 13 centrales analizadas, era de aproximadamente 0.50 centavos de dólar por KWh en el año 2000, lo cual se extrapola a externalidades del orden de los 465 millones de dólares anuales considerando únicamente los impactos a la salud humana, lo cual equivale al 0.1% del PIB y al 4% del gasto público de salud en el año de referencia (CEPAL, 2004).

Posteriormente, en el año 2012, con la finalidad de actualizar el estudio realizado por CEPAL en 2004, la Dirección General de Energía y Actividades Extractivas de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT desarrolló el denominado “Estudio para la cuantificación de externalidades de sistemas que involucran el aprovechamiento de energías renovables contra sistemas convencionales”. Como parte de dicho estudio se realizó el análisis y actualización de la evaluación de las externalidades de las 13 centrales termoeléctricas analizadas previamente por la CEPAL en 2004, considerando los datos de los años 2005 a 2009.

Sin embargo en este estudio no se contó con datos de las emisiones generadas en las centrales localizadas en las regiones de Rosarito, Baja California y Tula, Hidalgo, por lo que no fueron evaluadas sus externalidades. Adicionalmente para otras centrales no se contó con la información de todos los años evaluados por lo que se tomaron como base únicamente los años que presentaron menos inconsistencias.

Como resultado de esta evaluación se concluyó que del periodo 2005 al 2009 las 11 plantas en estudio tuvieron una generación bruta de electricidad de 260.6 TWh, para lo cual requirieron 32 Mton de carbón, 18, 295,000 m³ de combustóleo y 541 MMm³ de gas, generándose emisiones a la atmósfera por 462,916 de ton de partículas, 7, 236,408 ton de SO₂ y 154,682 ton de NO_x (SEMARNAT, 2009).

En el año 2013, a través de Tetra tech, USAID y la Dirección General de Sustentabilidad se llevó a cabo el “Estudio para la cuantificación de externalidades de sistemas que involucran el aprovechamiento de energías renovables contra sistemas convencionales 3^{era} Etapa”. Como parte de dicho estudio se realizó el análisis y actualización de la evaluación de las externalidades de seis centrales (Ciclo Combinado, Geotermia, Eólica, Relleno Sanitario e Ingenio Azucarero), considerando los datos de los años 2010.

3. Aplicación de la metodología ExternE

Con la finalidad de asegurar que los aspectos ambientales se encuentran integrados a las políticas públicas, en el tema de generación de energía eléctrica resulta imperioso conocer el costo real de la electricidad asegurando que las externalidades ambientales son tomadas en cuenta en los mecanismos de mercado. Por lo tanto en 1991, la Comisión Europea y el departamento de energía de Estados Unidos, unieron fuerzas en un proyecto de investigación que tenía como objetivo evaluar las externalidades ambientales por el uso de energía eléctrica. La naturaleza de este proyecto fue multidisciplinaria e incluyó a un gran número de investigadores expertos en diversos temas como energía, ingeniería, ciencias naturales, salud, ecologistas, economistas, etc.

Al terminar la primera fase del proyecto después de 4 años, fue generado un marco contable operacional que fue llamado *ExternE* en Europa; durante la segunda etapa únicamente se contó con colaboración Europea para dar seguimiento, mejorar, diseminar y comenzar la aplicación de este marco. En poco tiempo la metodología *ExternE* y su calidad científica comenzaron a ser reconocidos y aceptados a nivel internacional, lo que llevo consigo que este marco metodológico fuera utilizado para otras aplicaciones aparte de los sistemas de generación de energía, por ejemplo, en el sector transporte (*Krewitt, 2002*).

Sin embargo es importante tomar en cuenta que las estimaciones de los costos de estas externalidades deben realizarse dentro del contexto y reconociendo las limitaciones propias de la metodología, ya que no solo se presentan incertidumbres de naturaleza científica de los datos y del modelo, sino que también se presentan incertidumbres de política y éticas así como de falta de conocimiento acerca de las condiciones futuras, las cuales no pueden ser medidas a través de métodos estadísticos.

A lo largo de los años de implementación de ExternE, los resultados de la aplicación de la metodología han cambiado debido al nuevo conocimiento y a los cambios en las consideraciones de fondo tomadas, los principales cambios incluyen: el cambio de considerar impactos solo locales a impactos regionales, incluir los riesgos de mortalidad por emisión de partículas, incluir el concepto de “Valor de año de vida perdido” el cual considera la disposición a pagar por disminuir el riesgo de reducción de esperanza de vida en lugar del riesgo de muerte, y la adaptación de las funciones dosis-respuesta derivadas de estudios de Estados Unidos de América al contexto europeo.

Sin embargo, aún con los cambios realizados a la metodología, de acuerdo a una comparación realizada por *Krewitt* (*Krewitt, 2002*), las variaciones de las externalidades entre las energías tradicionales y las energías renovables se mantienen a través de los cambios realizados, como se puede observar en la siguiente gráfica. Es importante tomar en cuenta que para la realización de la gráfica el autor no tomó en cuenta los impactos

por calentamiento global, los cuales tendrán mayor impacto sobre las tecnologías que utilizan combustibles fósiles que sobre las renovables.

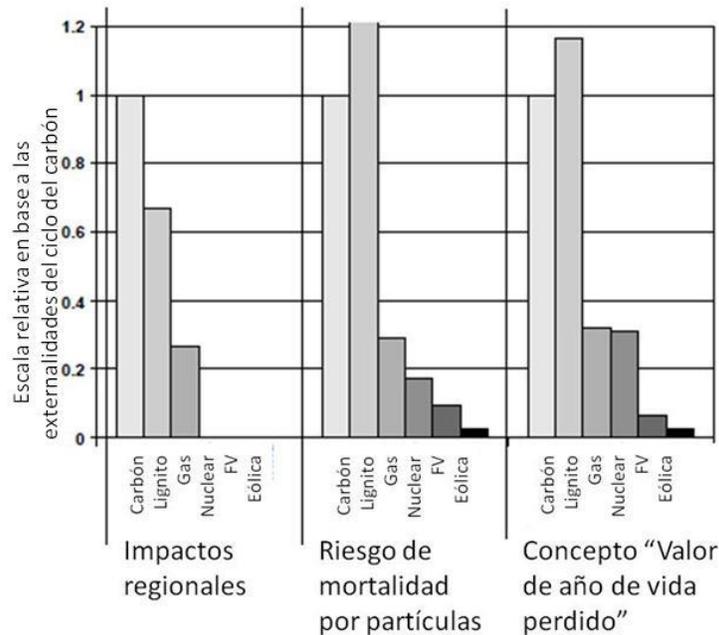


Ilustración 3. Clasificación relativa de las estimaciones de externalidades (excluyendo impactos por calentamiento global), para diferentes tecnologías de generación eléctrica bajo diversas suposiciones. Basada en (Krewitt 2002)

Para el caso específico de externalidades de tecnologías de energía renovables, es importante hacer notar que las externalidades reflejan el desempeño del sistema energético de referencia más que el desempeño de la tecnología por sí misma. Asimismo se deben tomar en cuenta los impactos potenciales de la implementación de las tecnologías renovables en los ecosistemas locales, ya que estos impactos por lo general son de mayor importancia que los impactos relativamente pequeños por emisiones.

Aún cuando las limitaciones de ExternE son importantes, esta metodología ha servido exitosamente como una herramienta para el análisis costo-beneficio para la toma de decisiones políticas, ya que en contraste con el cálculo de costos adicionales al precio de la electricidad, este caso no requiere cuantificaciones exhaustivas de todos los costos externos, ya que con el cálculo de las categorías más importantes se demuestra que los beneficios por evitar ciertos daños ambientales compensan los costos por lograr esta evasión (Krewitt, 2002).

La Unión Europea, ha utilizado esta metodología como herramienta para el desarrollo y/o evaluación de diversos ordenamientos como el anteproyecto de la directriz de

incineración, la directriz para plantas grandes de combustión, la estrategia de combate a la acidificación y los estándares de calidad del aire bajo la directriz de calidad del aire de la Unión Europea.

Asimismo a nivel nacional, los miembros de la Unión Europea han implementado esta metodología, para obtener los costos por externalidades ambientales para diversas tecnologías, como se puede observar en la tabla 2 los valores para los diferentes países varían debido a que los costos por daños a la salud humana cambian dependiendo de la ubicación de las plantas generadoras, ya que el volumen de población afectado depende de la localización de la fuente.

También se observa que se mantiene muy clara la tendencia de las externalidades de las energías renovables con costos muy por debajo de los costos por energías tradicionales, especialmente para la energía eólica y fotovoltaica. Recientemente se han realizado diversos estudios utilizando la metodología *ExternE* en diversos países, en la tabla 3 se presenta un resumen de estos estudios y los resultados que se han obtenido.

Se considera que aún cuando se toman en cuenta condiciones particulares de cada país en los diversos estudios, se puede observar consistencia en los resultados a través del tiempo, así mismo se presenta la misma tendencia de costos de externalidades para los diversos combustibles utilizados en la generación de energía eléctrica.

De acuerdo a los desarrolladores de la metodología (*European Commission, 2005*), ésta presenta los siguientes principios básicos:

1. La evaluación de los impactos se lleva a cabo en la medida de lo posible usando procedimientos cuantitativos, ya que sólo estos aseguran la transparencia y reproducibilidad necesarias.
2. La unidad común a la cual serán transformados todos los impactos es unidad monetaria, debido a que estas unidades son concebibles, transferibles, permiten comparar costos con beneficios y la internalización de los efectos.
3. La evaluación de los impactos se basa en la medida de las preferencias de la población afectada e informada.
4. El cambio en utilidad es entendido con respecto a los impactos evaluados, por lo que lo que se evalúa es el daño en sí y no la presión o el efecto.
5. Los costos externos son calculados para sitios, tiempos y tecnologías específicos, debido a que es un cálculo detallado ascendente.
6. Dependiendo de los requerimientos, los costos externos promedio ó agregados son calculados.

Tabla 2. Externalidades de la generación eléctrica en Europa (MX\$/MWh)

Basado en: ExternE National Implementation (European Commission, 1999)

* Costos actualizados a pesos mexicanos 2013

País	Carbón y lignito		Petróleo		Gas		Nuclear		Biomasa		Hidráulica		Fotovoltaica		Eólica	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Austria					245.9	581.1			536.4	558.8	0.9	0.9				
Bélgica	842.9	3417.3			250.6	501.2	91.1	107.1								
Alemania	632.6	1159.7	1075.4	1644.7	253.0	485.0	92.8	147.6	590.4	611.5			29.5	69.6	10.5	12.7
Dinamarca	787.2	1462.0			337.4	674.8			269.9	314.9					20.2	36.0
España	1159.5	1860.1			265.7	531.5			700.6	1256.2					43.5	45.9
Finlandia	502.9	1106.4							201.2	276.6						
Francia	1483.5	2128.5	1806.0	2343.6	516.0	752.5	53.8	53.8	129.0	150.5	129.0	129.0				
Grecia	1127.5	2058.9	637.3	1176.5	171.6	318.6			24.5	196.1	125.0	125.0			58.8	63.7
Irlanda	1385.0	1971.9														
Italia			778.0	1281.4	343.2	617.8					77.8	77.8				
Países Bajos	618.4	927.6			110.4	419.6	163.4	163.4	88.3	110.4						
Noruega					173.9	413.0			43.5	87.0	50.0	50.0			10.9	54.3
Portugal	988.5	1576.9			188.3	494.3			329.5	423.7	7.1	7.1				
Suecia	371.8	867.6							55.8	62.0	0.8	144.6				
Reino Unido	1052.4	1532.9	663.5	1075.3	251.7	503.3			121.3	130.4					29.7	34.3
Rango general	371.8	3417.3	637.3	2343.6	110.4	752.5	53.8	163.4	24.5	1256.2	0.8	144.6	29.5	69.6	10.5	63.7

Tabla 3. Estudios recientes de evaluación de externalidades a través de la metodología ExternE

Año de la publicación	País	Resultados			
2011 (Dimitrijevic, Tatic, Knezevic, & Salihbegovic, 2011)	Bosnia y Herzegovina	Se utilizaron datos de 2 centrales termoeléctricas que utilizan carbón como combustible principal, utilizando como base el año 2008 y se obtuvieron los siguientes costos unitarios de externalidades por MWh			
		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">Central termoeléctrica</th> <th style="width: 20%;">Unidad</th> <th style="width: 40%;">Costo unitario (MX\$/MWh)</th> </tr> </thead> </table>	Central termoeléctrica	Unidad	Costo unitario (MX\$/MWh)
		Central termoeléctrica	Unidad	Costo unitario (MX\$/MWh)	
		Planta termoeléctrica Tuzla	U3	1,848	
		Planta termoeléctrica Tuzla	U4	1,573	
		Planta termoeléctrica Tuzla	U5	1,533	
		Planta termoeléctrica Tuzla	U6	1,691	
		Planta termoeléctrica Kakanj	U5	2,182	
Planta termoeléctrica Kakanj	U6	2,988			
Planta termoeléctrica Kakanj	U7	3,008			
2010 (Hainoum, Almoustafa, & Seif Aldin, 2010)	Siria	Se utilizaron datos de 10 centrales termoeléctricas que utilizan gas natural, combustóleo y duales (que utilizan ambos combustibles), y se obtuvieron los siguientes costos unitarios de externalidades por MWh			
		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 35%;">Central termoeléctrica</th> <th style="width: 30%;">Combustible</th> <th style="width: 35%;">Costo unitario (MX\$/MWh)</th> </tr> </thead> </table>	Central termoeléctrica	Combustible	Costo unitario (MX\$/MWh)
		Central termoeléctrica	Combustible	Costo unitario (MX\$/MWh)	
		Deir Ali	Gas natural	9	
		Deir Azor	Gas natural	9	
		Mohrde	Combustóleo	387	
		Swedeah	Combustóleo	366	
		Qatena	Combustóleo	368	
		Haskah	Combustóleo	368	
		Aleppo	Combustóleo	340	
		Deir Ali (vapor)	Combustóleo	372	
		Banias	Dual	324	
Tishren	Dual	247			

La metodología *ExternE* propone el cálculo de externalidades ambientales mediante un enfoque de vías de impacto: este enfoque se presenta de manera general en la siguiente figura. Los desarrolladores de la metodología *ExternE* han tratado de cubrir las externalidades más relevantes, sin embargo siguen existiendo lagunas e incertidumbres que deben ser reducidas con investigación adicional.

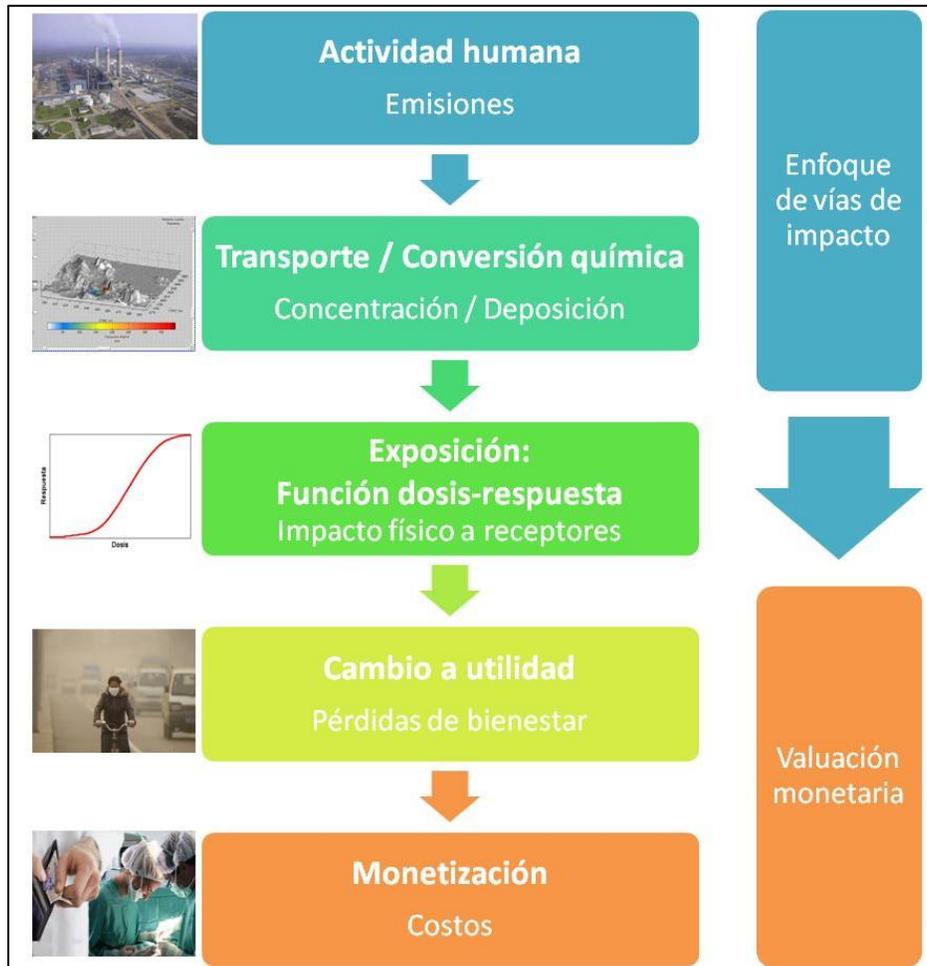


Ilustración 4. Enfoque de vías de impacto de la metodología *ExternE*.

Basado en (European Commission, 2005) y (European Commission, 2011)

3.1 Impactos ambientales relevantes asociados a las tecnologías evaluadas

Con la finalidad de evaluar las externalidades asociadas a las diversas tecnologías de generación eléctrica es primordial determinar los impactos ambientales asociados a cada tecnología, en la siguiente tabla se presenta un resumen de dichos impactos, los cuales debido a su relevancia son considerados en la presente evaluación de externalidades. También es importante resaltar que la presente evaluación de externalidades se concentra en la etapa de operación de las centrales, por lo que no se incluyen las etapas de construcción y/o desmantelamiento de las centrales, ya que se considera que la etapa con mayores impactos ambientales es la de operación. Es importante conservar el mismo alcance para todas las tecnologías evaluadas con la finalidad de que los resultados sean comparables.

Tabla 4. Impactos ambientales relevantes por tecnología

TECNOLOGÍA	IMPACTOS AMBIENTALES RELEVANTES
Ciclo combinado	Daños a salud por emisiones de contaminantes criterio. Contribución a cambio climático por emisiones de gases efecto invernadero.
Biogás (relleno sanitario)	Mitigación del cambio climático mediante la disminución de emisiones de gases efecto invernadero (metano) – Impacto positivo. Daños a salud por emisiones de contaminantes criterio
Biomasa residual (ingenio azucarero)	Mitigación del cambio climático mediante la disminución de emisiones de gases efecto invernadero debido a que el CO ₂ generado es parte del ciclo de carbono – Impacto positivo. Beneficio adicional Daños a salud por emisiones de contaminantes criterio. La quema de bagazo es una fuente importante de <i>black carbon</i> es un contaminante de vida corta.
Eólica	Impacto visual Emisiones de ruido Posible colisión de aves y murciélagos Posibles impactos por uso de suelo.
Geotérmica	Contribución al cambio climático por emisiones de gases efecto invernadero CO ₂ y de contaminantes tóxicos SO ₂ Afectación a paisaje Contaminación a cuerpos de agua

3.1.1 Daños a salud por emisiones de contaminantes criterio

Las tecnologías de ciclo combinado, biogás y biomasa residual generan emisiones atmosféricas que ocasionan daños a la salud de la población, los principales contaminantes emitidos son: partículas (PM_{10}), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2).

Para el cálculo de estas externalidades, la metodología ExternE propone el uso del programa Ecosense, sin embargo este programa ha sido desarrollado específicamente para su uso en la región europea, ya que incluye información de los receptores, meteorológica y de emisiones particulares de aquella región a través del uso de una red llamada EMEP del mediante una interfaz que transfiere los datos geográficos del EUROSTAT, asimismo para las emisiones se utilizan extrapolaciones basadas en los inventarios de las ciudades europeas (*Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy*, 2004).

Por lo tanto, el presente proyecto se realiza con un modelo simplificado llamado SIMPACTS, el cual ha sido diseñado para su uso en países en desarrollo, ya que requiere menor cantidad de información, sin embargo genera resultados comparables con modelos más sofisticados como Ecosense. El rango de las incertidumbres entre los resultados de modelos como ECOSENSE y SIMPACTS son similares, igualmente se han realizado pruebas en diferentes países las cuales han validado este modelo y han demostrado el valor y utilidad de esta metodología. Este programa fue desarrollado por el Organismo Internacional de Energía atómica y consta de 4 módulos que cubren impactos en salud, agricultura, bosques y materiales por contaminación atmosférica, de agua y por generación de residuos sólidos para diversas tecnologías (*OIEA*, 2006):

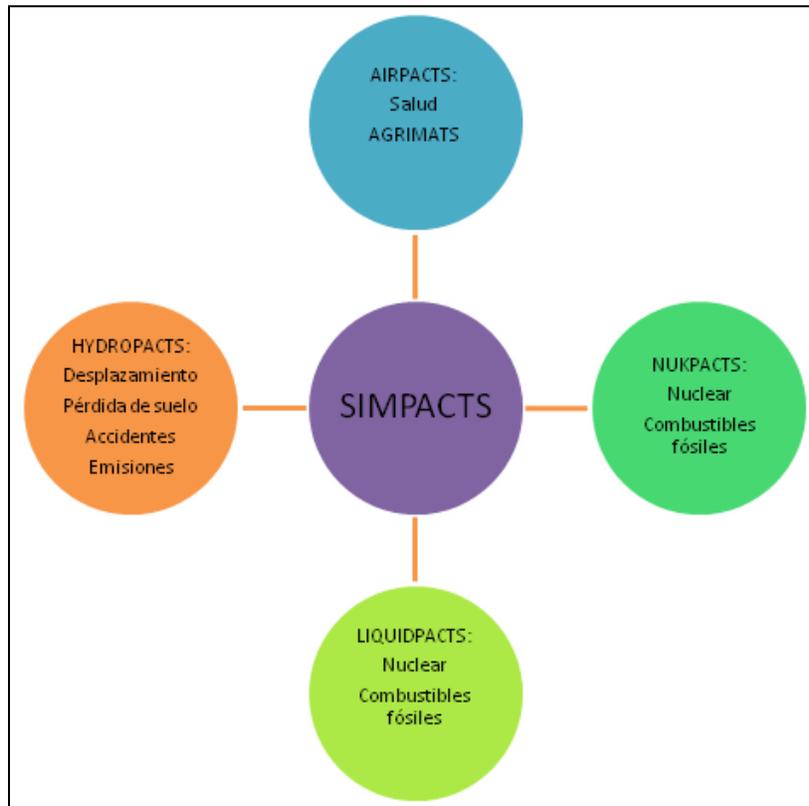


Ilustración 5. Estructura del modelo SIMPACTS

En el presente estudio se utiliza el módulo “Airpacts” para evaluar los impactos a la salud y los costos de daños asociados a los siguientes contaminantes: Partículas con diámetro menor a 10 μg (PM_{10}), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y contaminantes secundarios como los aerosoles de nitrato y sulfuro (OIEA, 2006).

3.1.1.1 Primera Etapa: Caracterización de la fuente emisora

Los impactos a salud humana son evaluados mediante un análisis de vías de impacto, el cual comienza con la identificación de las características físicas de la fuente y la preparación de un inventario detallado de las emisiones atmosféricas, cabe mencionar que para este estudio se consideran los datos del año 2010, el cual se usa como base.

Tabla 5. Centrales con impactos relevantes en salud humana por emisiones atmosféricas

No.	Central	Localización	Capacidad Efectiva Instalada (MW)
1	Central de Ciclo Combinado El Sauz	Pedro Escobedo, Querétaro	610
2	Central de Ciclo Combinado Dos Bocas	Medellín de Bravo, Veracruz	452
3	Relleno Sanitario de San Nicolás	Aguascalientes, Aguascalientes	3.2
4	Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata	Zacatepec de Hidalgo, Morelos	8.3

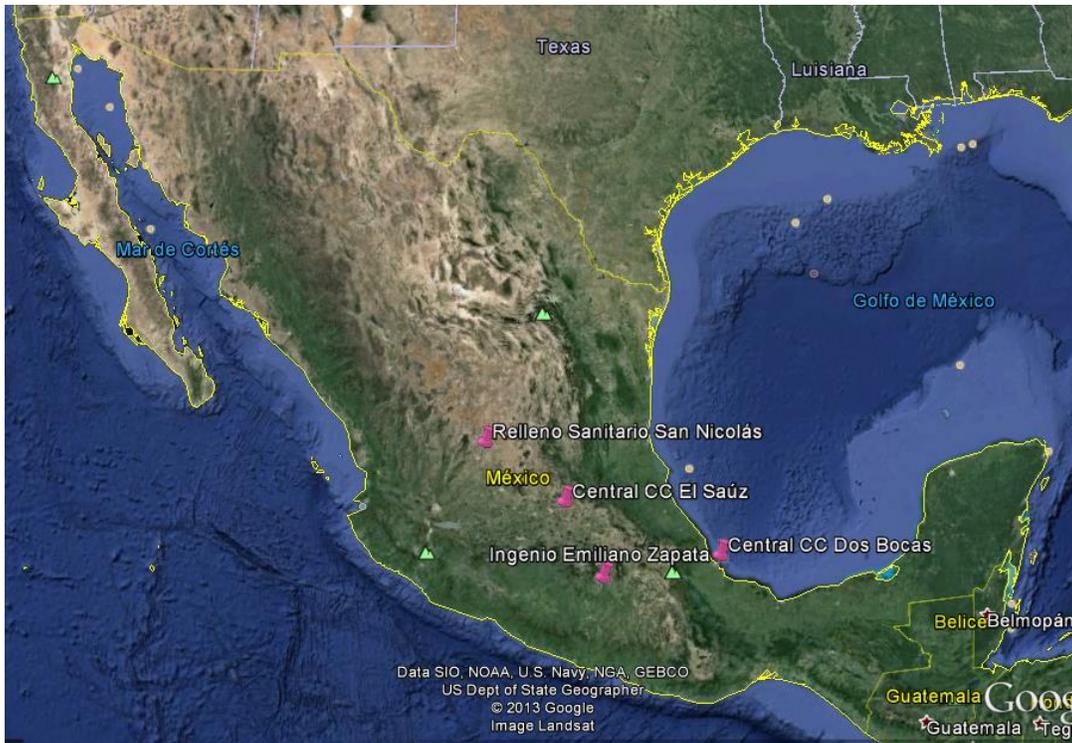


Ilustración 6. Localización de las centrales con impactos relevantes en salud humana por emisiones atmosféricas

La información presentada para la caracterización de las fuentes, fue generada a través del análisis de los datos obtenidos de las cédulas de operación anuales (COA) de cada una de estas centrales para el año 2010, las cuales fueron proporcionadas por la DGGCARETC, en cada caso se efectuó la revisión de los siguientes aspectos:

Revisión General de los Datos

- Datos de Registro con énfasis en la denominación, coordenadas geográficas y la altura sobre el nivel del mar.
- Técnicos:
 - Revisión de tabla resumen.
 - Estimación de factor de planta.
 - Tipos de combustibles usados, contenidos de azufre (%S) y consumos totales y parciales.
 - Número, horas de operación y capacidades de los generadores de vapor.
 - Características de las chimeneas y corrientes gaseosas.
 - Tipo de contaminantes evaluados, concentraciones y comparación contra NOM-085-SEMARNAT-1994.
 - Emisiones Anuales reportadas.
- Criterios Generales para el Control de Calidad
 - Cobertura:
 - Número de equipos reportados y evaluados.
 - Número de contaminantes reportados por fuente.
 - Consistencia:
 - Orden de magnitud de las emisiones.
 - Unidades usadas en concentraciones y emisiones.
 - Consumo y tipos de combustibles.
 - Consistencia entre el consumo global de combustible reportado contra los consumos parciales reportados por equipo.
 - Consistencia entre los consumos de combustible, número de horas de operación y la capacidad nominal de los equipos de combustión.
 - Verificación del orden de magnitud entre las emisiones reportadas a partir de muestreos en chimeneas (MD) y las obtenidas a partir de su respectiva estimación por factores de emisión o balances de materiales.
 - Consistencia entre las emisiones anuales reportadas y los valores de concentración y/o emisiones reportadas de parámetros sujetos a norma.
 - Rangos de parámetros NO_x/SO₂; CO/NO_x; PM₁₀/SO₂ para combustibles líquidos basados en los factores de emisión.

Adicionalmente, con base a los consumos de combustible validados se procede a la estimación de las emisiones a partir de los factores de emisión y se efectuó un comparativo contra los parámetros reportados por cada central. Cuando el orden de magnitud reportado es similar al del factor de emisión (FE) se selecciona el valor

reportado. Los valores no reportados por la central se complementan por los obtenidos a través de los FE y cálculos de ingeniería.

Entre los principales hallazgos de la primera revisión se observó que algunas centrales reportan las emisiones de NO_x en la sección V de la COA, condición que contraviene la primera instrucción de la sección II donde se establece claramente que deben reportarse las emisiones de PM, PM₁₀, SO₂, NO_x, CO, HCT y COV.

Por otra parte, se observa que la mayor parte de las centrales reportan emisiones anuales de parámetros sujetos a norma por factores de emisión lo cual contraviene también lo dispuesto en la sección 2.3. En ciertos casos las emisiones de PM₁₀ usadas para fines de modelación se obtuvieron a partir de la aplicación de radios recomendados CARB en la herramienta denominada PMSize.

Asimismo para los datos de velocidades de deposición, estos fueron obtenidos del modelo SIMFACTS (OIEA, 2006). En las siguientes tablas se presentan los resultados del análisis de la información, conforme a los criterios antes mencionados.

Central de Ciclo Combinado El Sauz				
	Dirección		Autopista México - Querétaro Km 176.5, Municipio Pedro Escobedo, Querétaro, C.P.76729	
	Coordenadas		Latitud Norte 20° 27' 25'' Longitud Oeste 100° 7' 8''	
	Tipo		Ciclo Combinado	
Descripción de las unidades	Ciclo	Unidad	Capacidad (MW)	Año de inicio de operaciones
	1	TG-1	61	1982 – 1983
		TG-2	61	
		TG-3	61	
		TV-4	263	
	2	TG-5	150	
		TG-6	150	
		TV-7	158	
Emisiones Atmosféricas			Datos de la Chimenea	
Contaminante	Tasa de emisión (ton/año)	Velocidad de deposición (cm/s)	Altura (m)	22
PM₁₀	496.5	0.49	Diámetro (m)	4
NO_x	12,212.0	1.47	Velocidad de Gases (m/s)	34.75
SO₂	7.5	1.00	Temperatura del Gas (K)	468.15
CO	1,300.0	1.00	Tipo de Combustible	Consumo Anual
Aerosoles de Nitrato		0.71	Gas Natural	775,992,742 m ³
Aerosoles de Sulfato		1.73	Diesel	1,227 m ³

Central de Ciclo Combinado Dos Bocas						
			Dirección		km. 7.5 Carretera Veracruz Medellín, Municipio Medellín, Veracruz, C.P. 91910,	
			Coordenadas		Latitud Norte 19° 1' 30'' y Longitud Oeste 96° 12' 26''	
			Tipo		Ciclo Combinado	
Descripción de las unidades	Paquete		Unidad	Capacidad (MW)	Año de inicio de operaciones	
	1			TG-1	63	1974
				TG-2	63	1974
				TV-5	100	1975
	2			TG-3	63	1975
				TG-4	63	1975
				TV-6	100	1975
Emisiones Atmosféricas				Datos de la Chimenea		
Contaminante	Tasa de emisión (ton/año)	Velocidad de deposición (cm/s)	Altura (m)	22.25		
PM ₁₀	412.2	0.49	Diámetro (m)	2.78		
NO _x	5,089.0	1.47	Velocidad de Gases (m/s)	243.33		
SO ₂	6.2	1.00	Temperatura del Gas (K)	457.50		
CO	1,082.0	1.00	Tipo de Combustible	Consumo Anual		
Aerosoles de Nitrato		0.71	Gas Natural	646,086,550 m ³		
Aerosoles de Sulfato		1.73				

Relleno Sanitario de San Nicolás				
	Dirección		Carretera cañada honda km. 9.5, San Nicolás de Arriba, Aguascalientes.	
	Coordenadas		Latitud Norte 21°57' 57'' y Longitud Oeste 102° 12' 48''	
	Tipo		Relleno Sanitario	
No. de Unidades		Unidad	Capacidad (MW)	Año de inicio de operaciones
		1	1.6	
		2	1.6	1998
Emisiones Atmosféricas			Datos de la Chimenea	
Contaminante	Tasa de emisión (ton/año)	Velocidad de deposición (cm/s)	Altura (m)	7
PM ₁₀	2.23	0.49	Diámetro (m)	0.35
NO _x	149.00	1.47	Velocidad de Gases (m/s)	30.8
SO ₂	3.50	1.00	Temperatura del Gas (K)	448.15
CO	64.00	1.00	Tipo de Combustible	Consumo Anual
Aerosoles de Nitrato		0.71	Biogás	7,000,000 m ³
Aerosoles de Sulfato		1.73		

Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata				
	Coordenadas		Latitud Norte 18° 39' 10'' y Longitud Oeste 99° 11' 50''	
	Tipo		Ingenio Azucarero	
No. de Unidades	Descripción de las calderas en el año 2010			
	Caldera	Capacidad (lb/h)	Año de inicio de operaciones	
	1	55,000	Zafra 1937 - 1938	
	2	55,000		
	3	55,000		
	7	85,000		
	9	95,000		
	10	105,000		
	11	150,000		
	Descripción Actual de las calderas del Ingenio Emiliano Zapata			
Caldera	Capacidad (lb/h)	Año de inicio de operaciones		
1	132,000	Zafra 2012-2013		
2	85,000	Zafra 1937 – 1938		
3	95,000			
4	105,000			
5	150,000			
Emisiones Atmosféricas				
	Con equipo de control de PM₁₀		Sin equipo de control de PM₁₀	
Contaminante	Tasa de emisión (ton/año)	Velocidad deposición (cm/s)	Tasa de emisión (ton/año)	Velocidad deposición (cm/s)
PM₁₀	231.91	0.49	2,319.15	0.49
NO_x	994.93	1.47	997.76	1.47
SO₂	997.76	1.00	994.93	1.00
CO	12,741.92	1.00	12,741.92	1.00
Aerosoles de Nitrato		0.71		0.71
Aerosoles de Sulfato		1.73		1.73

Datos de la Chimenea		Tipo de Combustible	Consumo Anual
Altura (m) 24	Velocidad de Gases (m/s) 13	Combustóleo Pesado (CBP)	4,532 m ³
Diámetro (m) 1	Temperatura del Gas (K) 453.15	Bagazo (BG)	335,242 ton/año

3.1.1.2 Segunda Etapa: *Dispersión atmosférica*

Para esta etapa se utilizan modelos de dispersión separados para calcular el incremento marginal de las concentraciones de contaminantes atmosféricos. La dispersión atmosférica se subdivide en local, la cual se extiende hasta 50 kilómetros en todas las direcciones tomando como centro la fuente, y en regional debido al transporte de los contaminantes más allá del área local. El área regional típicamente se extiende un poco más de 1,000 km del punto de emisión (OIEA, 2006).

En el área local, la dispersión de los contaminantes es mayormente influenciada por los parámetros meteorológicos, de los cuales los más importantes son la velocidad del viento, la dirección del viento, la clase Pasquill (estabilidad atmosférica) y la altura de mezcla.

La conversión química en el aire del SO₂ y NO_x en contaminantes secundarios (sulfatos y nitratos) y aerosoles por lo general es insignificante en el área local, debido a que estas especies se forman típicamente a decenas de kilómetros de la fuente. Conforme los contaminantes son transportados lejos de la fuente aumenta el mezclado con el aire debido a la turbulencia atmosférica y eventualmente las concentraciones se mantienen uniformes en la capa de mezcla atmosférica. A distancias mayores a 50 km, las reacciones químicas y la deposición debida al asentamiento gravitacional y a la precipitación juegan un rol muy importante en la remoción de los contaminantes en el aire (OIEA, 2006).

Para llevar a cabo esta etapa, se solicitó la información necesaria al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cabe mencionar que debido a que no se cuenta con estaciones meteorológicas en cada una de las centrales generadoras, se seleccionaron las estaciones del SMN y del INIFAP más cercanas a cada una de las centrales, asimismo debido a que en algunos casos no se cuenta con todos los registros del año 2010, se utilizaron registros de otros años como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 6. Estaciones meteorológicas consultadas por central

No.	Central	Coordenadas de la Central	Estación Meteorológica	Coordenadas de la Estación Meteorológica	Período Considerado
1	Central de Ciclo Combinado El Sauz	20° 27' 25" N 100° 7' 8" O	Huimilpan, Querétaro	20° 23' 24" N 100° 17' 00" O	Enero – Diciembre 2012
2	Central de Ciclo Combinado Dos Bocas	19° 1' 30" N 96° 12' 26" O	El Salado, Veracruz	19° 02' 27" N 95° 58' 15" O	Enero – Diciembre 2010
3	Relleno Sanitario de San Nicolás	21° 57' 57" N 102° 12' 48" O	UAA La Posta, Aguascalientes	21° 58' 20" N 102° 21' 44" O	Enero – Diciembre 2011
4	Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata	18° 39' 10" N 99° 11' 50" O	INIFAP -Zacatepec, Morelos	18°65'31" N 99° 20'08" O	Enero – Diciembre 2010

Los datos requeridos para cada una de estas estaciones son la dirección del viento (grados del Norte), la velocidad del viento (cm/s), la temperatura ambiente (K) y la altura del anemómetro (m); Todos estos parámetros, excepto la altura del anemómetro se presentan para cada hora para los años 2010, 2011 y 2012 según corresponda a cada estación meteorológica (Ver Anexo 1. Información meteorológica). Durante la modelación de la dispersión atmosférica con el software SIMPACTS, se utilizó la opción que no considera las clases Pasquill, debido a que el software no aceptó las bases de datos que incluían la información correspondiente a las clases Pasquill por hora, sin embargo se ha consultado a la OIEA a través de la SENER con la finalidad de incluir las bases de datos meteorológicas con la información completa en las modelaciones.

3.1.1.3 Tercera Etapa: Evaluación de impactos

La siguiente etapa consiste en cuantificar los impactos a través de Funciones de Exposición-Respuesta (FER) las cuales relacionan las concentraciones de contaminantes al impacto que tendrán en los receptores (salud humana, cultivos, etc.). Las funciones de exposición - respuesta- para impactos a salud humana son tomadas del estudio *ExternE* (European Commission, 2005), el cual a su vez es basado en estudios epidemiológicos.

Estos impactos en salud humana incluyen impactos en mortalidad, los cuales para el caso de adultos se cuantifican en base al enfoque de años de vida perdidos (AVP) ó reducción de la esperanza de vida para la población en riesgo por unidad de incremento de la concentración de los diversos contaminantes estudiados en la atmósfera (OIEA, 2006). Los AVP son una medida de mortalidad prematura que toma en cuenta la edad a la que ocurre la muerte, dando mayor peso a las muertes ocurridas a menor edad.

Adicionalmente se evalúan los impactos en morbilidad, los cuales incluyen los:

- Casos de asma
- Admisiones a hospitales
- Casos de bronquitis crónica
- Días con síntomas de enfermedades del tracto respiratorio inferior
- Días de actividad restringida

Estos impactos se expresan como casos por año por persona por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($FER_{pendiente}$) y son calculados como el producto del incremento del radio de riesgo, la tasa de incidencia y la fracción de la población afectada de acuerdo al parámetro de estudio.

$$FER_{pendiente} = IRR \times Tasa\ de\ incidencia \times Fracción\ de\ la\ población$$

El incremento del radio de riesgo (IRR) es el porcentaje de cambio de la tasa de ocurrencia de una enfermedad en particular en la población en riesgo relativo a la línea base ó la tasa nominal de ocurrencia de dicha enfermedad por unidad de cambio en la concentración atmosférica y es determinado en base a estudios epidemiológicos y análisis estadísticos, sin embargo estos estudios tienen limitaciones, por lo tanto los desarrolladores del modelo SIMPACTS recomiendan el uso de los resultados de estudios generados en Europa y Norteamérica en lugar de valores específicos por país, aún cuando las diferentes poblaciones pueden tener diferentes sensibilidades y por lo tanto presentar diferentes IRRs, esto tomando en cuenta que las incertidumbres de un solo estudio son muy grandes. La siguiente tabla presenta los valores de incremento del radio de riesgo utilizados por el programa SIMPACTS para cada uno de los contaminantes y FERs considerados en el estudio (OIEA, 2006).

Tabla 7. Incrementos del radio de riesgo (OIEA, 2006)

FUNCION EXPOSICION-RESPUESTA	IRR POR $\mu\text{G}/\text{m}^3$		
	PM ₁₀	NITRATOS	SULFATOS
Mortalidad infantil (casos en niños menores de 12 meses de edad)	0.400	0.200	0.400
Mortalidad aguda, años de vida perdida (población total)	0.030	0.015	0.030
Uso de broncodilatador. Casos de uso (adultos asmáticos +20)	0.050	0.025	0.050
Uso de broncodilatador. Casos de uso (niños 5-14)	0.045	0.022	0.045
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (adultos con síntomas crónicos)	0.119	0.059	0.119
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (niños 5-14)	0.340	0.170	0.340
Días de actividad restringida (adultos trabajadores 15-64)	0.285	0.142	0.285
Días de actividad restringida (adultos no trabajadores 15-64)	0.285	0.142	0.285
Admisiones a hospitales por causas cardiacas, admisiones (población total)	0.060	0.030	0.060
Admisiones a hospitales por causas respiratorias, admisiones (población total)	0.114	0.057	0.114
Bronquitis crónica, casos (adultos 27+)	0.700	0.350	0.700

Asimismo para la tasa de incidencia se utilizó la información disponible por parte de la SS, INEGI y para los parámetros con los que no se cuenta información a nivel nacional disponible, se utilizan los datos propuestos por el propio modelo SIMPACTS. En el Anexo 2 se presenta la información utilizada para cada una de las centrales.

Tabla 8. Fuentes de información utilizadas para las tasas de incidencia

FUNCION EXPOSICION-RESPUESTA	FUENTE DE INFORMACIÓN PARA LA TASA DE INCIDENCIA
Mortalidad infantil (casos en niños menores de 12 meses de edad)	Tasa de mortalidad infantil estatal (INEGI, 2010)
Mortalidad aguda, años de vida perdida (población total)	Tasa bruta de mortalidad estatal (INEGI, 2010)
Uso de broncodilatador. Casos de uso (adultos asmáticos +20)	SIMPACTS (OIEA, 2006)
Uso de broncodilatador. Casos de uso (niños asmáticos 5-14)	
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (adultos con síntomas crónicos)	
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (niños 5-14)	
Días de actividad restringida (adultos trabajadores 15-64)	
Días de actividad restringida (adultos no trabajadores 15-64)	
Admisiones a hospitales por causas cardíacas, admisiones (población total)	
Admisiones a hospitales por causas respiratorias, admisiones (población total)	Egresos hospitalarios por causa respiratoria incluye bronquitis, bronquiolitis y otras infecciones respiratorias agudas bajas, neumonía e influenza, infecciones respiratorias agudas altas y otras enfermedades respiratorias (SS, 2009)
Bronquitis crónica, casos (adultos 27+)	Incidencia de neumonía y bronconeumonía estatal – (INEGI, 2008)

Finalmente para el parámetro “fracción de la población” también se utilizó mayormente información del INEGI, la cual se complementó con información de publicaciones científicas y del modelo SIMPACTS para algunos parámetros, como se observa en la siguiente tabla, también en el anexo 2 se presentan los datos utilizados para cada una de las centrales.

Tabla 9. Fuentes de información utilizada para la fracción de la población afectada

FUNCION EXPOSICION-RESPUESTA	FUENTE
Mortalidad infantil (casos en niños menores de 12 meses de edad)	Grupo de edad 0-4 años por estado (INEGI, 2010)
Mortalidad aguda, años de vida perdida (población total)	Población total (1)
Uso de broncodilatador. Casos de uso (adultos asmáticos +20)	Incidencia estatal anual de asma (2003-2007) (Vargas Becerra, 2009)
Uso de broncodilatador. Casos de uso (niños asmáticos 5-14)	Estimación de la incidencia estatal del asma bronquial (5 a 14 años) 2010 (Roa Castro, y otros, 2009) * grupo de edad 5-14 años por estado (INEGI, 2010)
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (adultos con síntomas crónicos)	SIMPACTS
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (niños 5-14)	Grupo de edad 5-14 años por estado (INEGI, 2010)
Días de actividad restringida (adultos trabajadores 15-64)	Población económicamente activa ocupada 15-64 por estado (INEGI, 2010)
Días de actividad restringida (adultos no trabajadores 15-64)	Población económicamente activa desocupada por estado (INEGI, 2010)
Admisiones a hospitales por causas cardíacas, admisiones (población total)	Población total (1)
Admisiones a hospitales por causas respiratorias, admisiones (población total)	Población total (1)
Bronquitis crónica, casos (adultos 27+)	Porcentaje de población mayor a 29 años por estado (INEGI, 2010)

3.1.1.4 Cuarta Etapa: Monetización

Una vez que se han calculado los impactos, es importante monetizarlos, ya que permite conjuntar todos los impactos considerados en diferentes unidades físicas en un solo indicador, de acuerdo al modelo SIMPACTS (OIEA, 2006), para obtener los costos de los daños, se multiplican los impactos por sus unidades de costo. Para los impactos en morbilidad, se incluyen los costos por enfermedad y pérdidas en productividad y salario, los cuales son considerados como factores basados en mercado, sin embargo también se consideran otros factores que no son basados en mercado, como la disposición de los individuos por pagar para evitar el riesgo de sufrir las consecuencias inherentes a las enfermedades consideradas.

Asimismo para los impactos de mortalidad se determinan los valores de años de vida perdida (AVP), los cuales se basan en los valores estadísticos de vida, que en general es el costo que la población está dispuesta a pagar para evitar una muerte prematura. Las unidades de costo para monetizar los impactos a la salud son tomados del estudio ExternE (*European Commission*, 2005).

Debido a que estos costos están calculados con base a la información de los miembros de la Unión Europea, para el caso de México, se multiplican estos costos por el radio de producto interno bruto (PIB) per cápita expresado en paridad de poder adquisitivo (PPA) de México y la Unión Europea, el cual es considerado como USD 11,954.00 de acuerdo a lo establecido por el modelo SIMPACTS. Este ajuste toma en cuenta las diferencias de ingresos entre países y por lo tanto la disposición de pago de la población.

Las incertidumbres inherentes al modelo pueden ser grandes, debido a que la información disponible con referencia a los efectos de los contaminantes no es lo suficientemente detallada. De acuerdo al modelo SIMPACTS (OIEA, 2006), existen estudios que determinan que los valores pueden ser hasta cuatro veces más pequeños o más grandes que las estimaciones centrales, sin embargo esta información por lo general es suficiente para la toma de decisiones de política y para emitir recomendaciones. En la siguiente tabla se presentan los costos unitarios para cada una de las funciones de exposición-respuesta considerados para México, estos datos son obtenidos del modelo SIMPACTS y son particulares para cada país, ya que consideran el radio del PIB per cápita expresado en PPA entre México y la Unión Europea (como se mencionó previamente).

Tabla 10. Costos por unidad de función exposición-respuesta para México (OIEA, 2006)

FUNCIÓN EXPOSICION-RESPUESTA	COSTO POR UNIDAD DE FUNCIÓN EXPOSICIÓN-RESPUESTA USD POR CASO
Mortalidad crónica, años de vida perdida (población total)	343,840
Mortalidad infantil (casos en niños menores de 12 meses de edad)	6,876,553
Mortalidad aguda, años de vida perdida (población total)	515,699
Uso de broncodilatador. Casos de uso (adultos asmáticos +20)	7
Uso de broncodilatador. Casos de uso (niños 5-14)	7
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (adultos con síntomas crónicos)	259
Síntomas de enfermedad del tracto respiratorio inferior, días (niños 5-14)	259

FUNCION EXPOSICION-RESPUESTA	COSTO POR UNIDAD DE
Días de actividad restringida (adultos trabajadores 15-64)	899
Días de actividad restringida (adultos no trabajadores 15-64)	311
Admisiones a hospitales por causas cardiacas, admisiones (población total)	13,845
Admisiones a hospitales por causas respiratorias, admisiones (población total)	13,845
Bronquitis crónica, casos (adultos 27+)	1,375,359

3.1.1.5 Quinta Etapa: Estimación de los costos totales de daños

El componente de estimación de costos utilizado por el programa SIMPACTS fue desarrollado por Spadaro en 1999. De acuerdo a este modelo, los costos del daño **D** es obtenido por la función de evaluación del daño y se expresa como el producto de la densidad del receptor (densidad de población) **ρ** , la función exposición-respuesta **f_{ER}** , el cambio incremental de la concentración a nivel del suelo **\dot{C}** debido a la tasa de emisión **Q** y la unidad de costo **U_v** , integrado en todos los receptores afectados por la contaminación:

$$D = \int_{\text{Área de impacto}} \rho(r) \times f_{ER}(r, \dot{C}(r, Q, m)) \times \dot{C}(r, Q, m) \times U_v \delta r$$

Donde **r** es el vector de la posición del receptor, con su origen en el sistema de coordenadas fijo en la ubicación de la fuente y **m** es el vector de los parámetros de las condiciones meteorológicas locales (OIEA, 2006).

Para el modelo AIRPACTS la pendiente de la función exposición-respuesta, se asume como independiente de las concentraciones atmosféricas y constantes para todos los valores de **r** , por lo que:

$$f_{ER} = (r, \dot{C}(r, Q, m)) = f_{ER}$$

$$D = \frac{\rho_{L+R} \times f_{ER} \times Q \times U_v}{k(r)} \times R, \text{ con } R = \int_{\text{área de impacto}} \frac{\rho(r)k(r)\dot{C}(r, Q, m)}{Q} dr$$

Donde ρ_{L+R} es la densidad de población promedio sobre tierra y agua que incluye las áreas locales y regionales, $k(r)$ es la velocidad de deposición total del contaminante incluyendo la remoción del contaminante por deposición y por transformación química, y se define como $k(r)=M(r)/\dot{C}(r,Q,m)$, donde $M(r)$ es la tasa de deposición por unidad de área el cual se asume como proporcional al cambio incremental en la concentración del aire ambiente a nivel de suelo $\dot{C}(r,Q,m)^2$. La ecuación 3 se resuelve analíticamente utilizando algunas suposiciones simplificadas, como pueden ser:

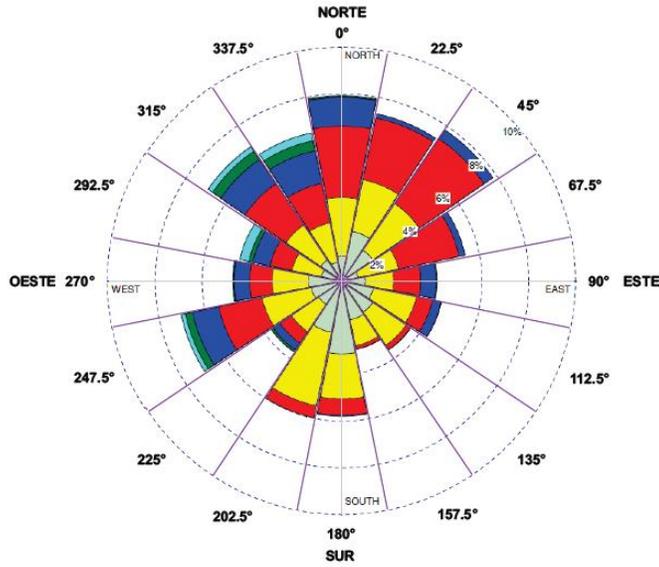
1. SUWM – Modelo Mundial Uniforme Simplificado mediante el cual se obtienen únicamente los impactos totales sin distinción entre los impactos en áreas locales y regionales.
2. RUWM1 – Modelo Mundial Uniforme Robusto, el cual mejora los resultados del modelo SUWM para los contaminantes primarios, ya que modela las concentraciones incrementales de los contaminantes dependiendo de las condiciones meteorológicas locales y de las condiciones particulares de la fuente.
3. RUWM2 – Modelo Mundial Uniforme Robusto 2, el cual mejora aún más los resultados de los modelos SUWM y RUWM1, para contaminantes primarios, ya que incorpora condiciones locales adicionales.
4. QUERI – Modelo de estimación rápida de impactos a la salud respiratoria, el cual da las estimaciones más precisas para los impactos locales ya que desarrolla un modelo gaussiano de dispersión detallado de los contaminantes primarios.

Para el presente estudio se utiliza el modelo QUERI ya que es el que presenta las estimaciones más precisas, para este modelo se requiere información completa de las condiciones meteorológicas locales, de las características de la chimenea y de la distribución de la población local.

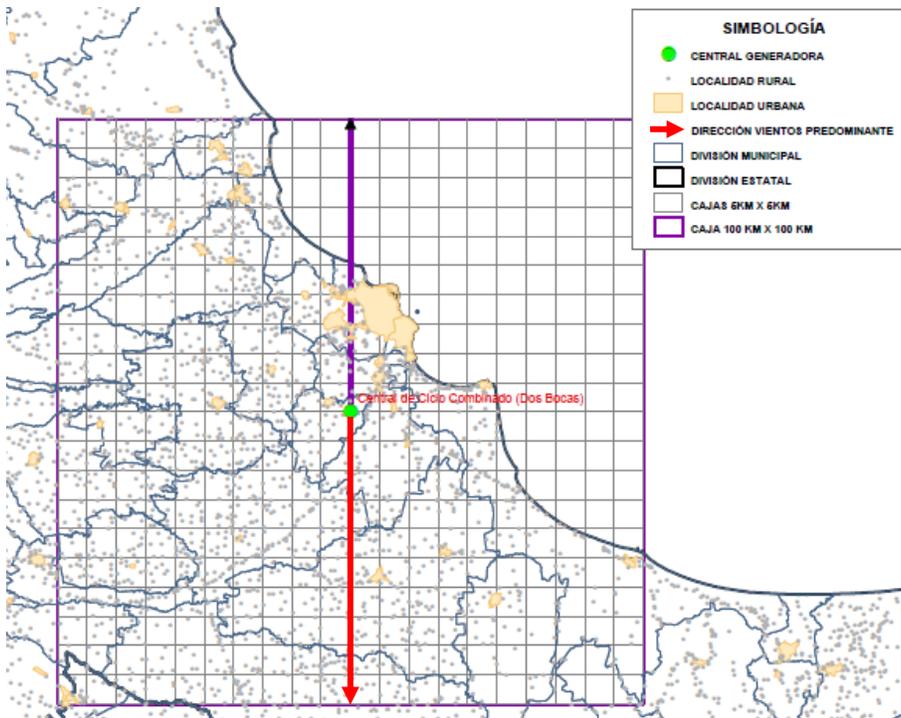
El modelo requiere información de la distribución de la población local con una resolución de 5 por 5 km cubriendo un área de 10,000 km² tomando la fuente como origen, para lo cual se utilizó la información geográfica contenida en el Marco Geoestadístico Nacional 2010 publicado por el INEGI.

Adicionalmente es necesario utilizar como eje de las X la dirección del viento predominante, por lo tanto se generaron las rosas de vientos y se generaron las cuadrículas conforme al grado del viento predominante, como se muestra en las siguientes figuras, las matrices con los datos de la distribución de la población se pueden consultar en el anexo 3.

Central de Ciclo Combinado Dos Bocas (Dos Bocas, Veracruz)

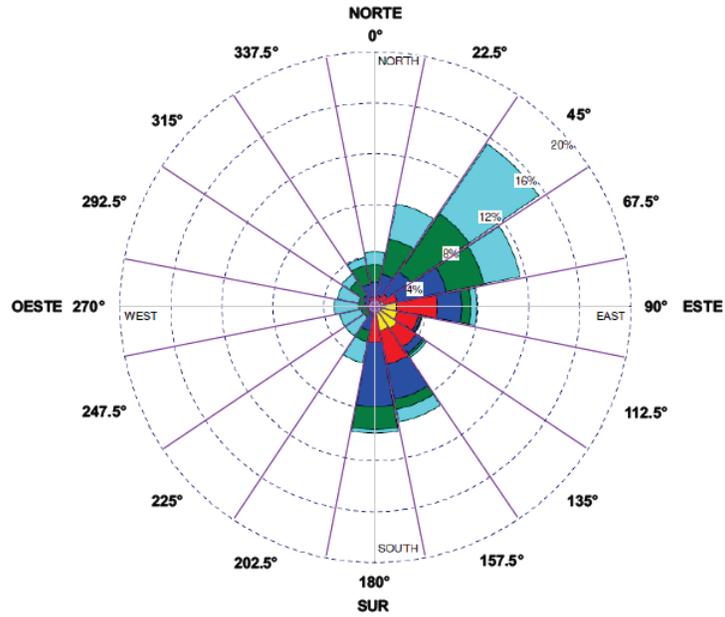


Rosa de vientos
Viento predominante 0°

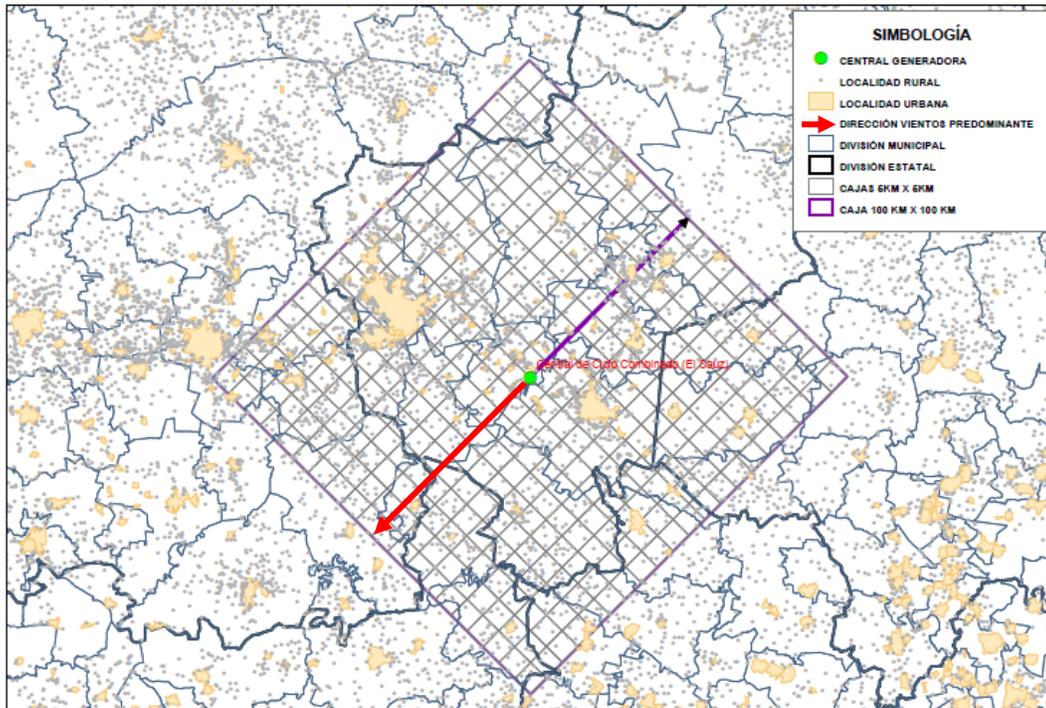


Distribución de la población

Central de Ciclo Combinado El Sauz (Pedro Escobedo, Querétaro)

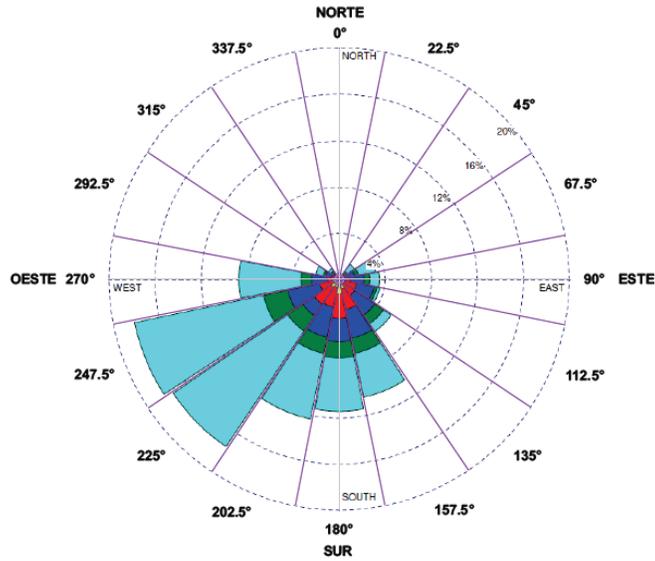


Rosa de vientos
Viento predominante 45°

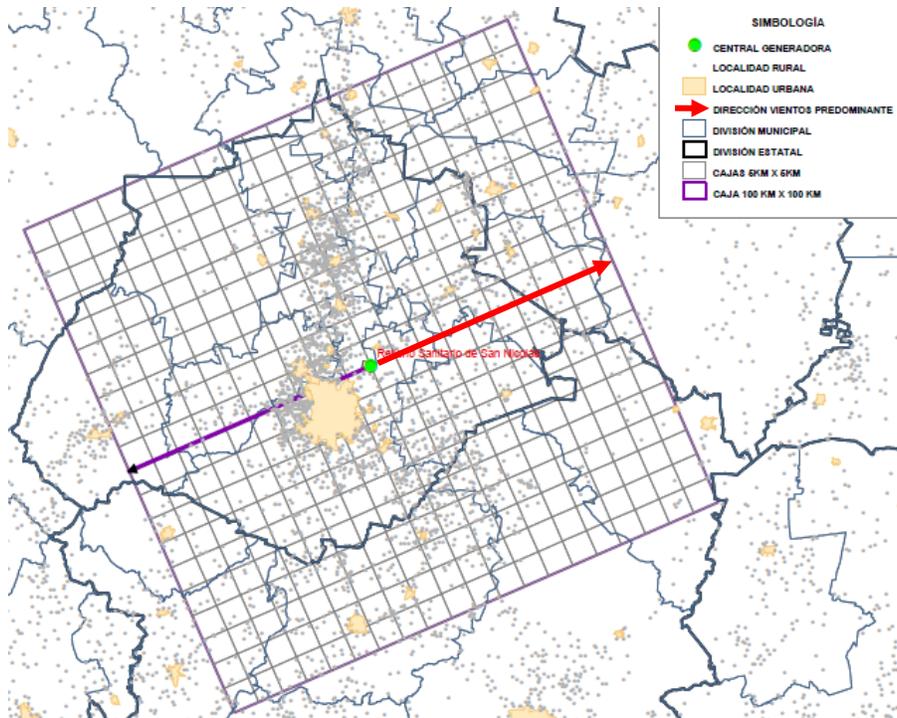


Distribución de la población

Relleno Sanitario de San Nicolás (Aguascalientes, Aguascalientes)

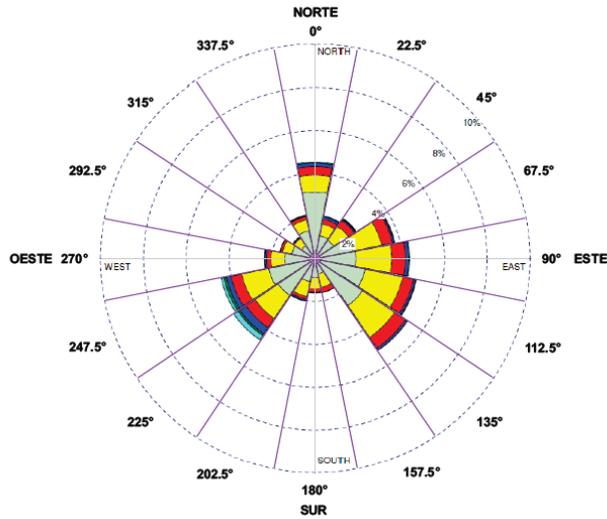


Rosa de vientos
Viento predominante 250°

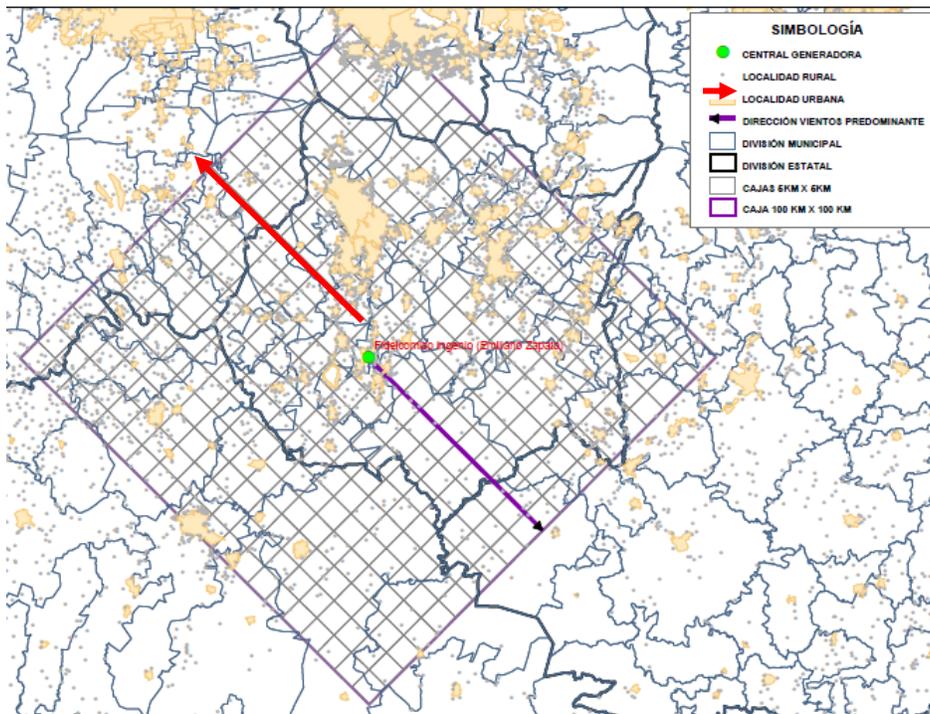


Distribución de la población

Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata (Zacatepec de Hidalgo, Morelos)



Rosa de vientos
Viento predominante 135°



Distribución de la población

Con esta información, el modelo QUERI utiliza el modelo gaussiano de Fuentes Industriales Complejas (ISC) de largo plazo de la USEPA versión 3, mediante el cual se calculan las concentraciones en los centroides de cada una de las células de 5 x 5 km. En esta versión del modelo QUERI, por simplicidad, se asume que la topografía es en general plana y que la remoción de los contaminantes por deposición y transformación química es insignificante.

Los costos del daño para el área local debido a los contaminantes primarios se calculan de la siguiente manera:

$$D_{p,L} = \sum_{j=1}^{400} (\text{población por celda de } 5 \times 5 \text{ km})_j \times f_{ER,p} \times C_j \times U_v$$

Asimismo para los contaminantes secundarios se generan basados en los impactos calculados por el modelo SUWM (D_{SUWM}), y los costos de los daños para el área regional por contaminantes primarios se calculan de la siguiente manera:

$$D_{p,L} = D_{SUWM} \times \text{Exp}(dc \times RAD_L)$$

Donde D_{SUWM} es dada por la siguiente ecuación:

$$D_{SUWM} = \frac{\rho_{L+R} \times f_{ER,p} \times Q \times U_v}{k_p}$$

Adicionalmente, dc es la constante de descomposición del contaminante que se define como $k / (U_R h)$, donde k es la velocidad de deposición del contaminante, U_R es la velocidad media del viento a nivel regional y h es la altura de mezclado.

Los costos totales de daño debido a los contaminantes primarios es la suma de las estimaciones locales y regionales (Ecuaciones 4 y 5), mientras que para estimar el impacto de los contaminantes secundarios se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_s = \frac{\rho_{L+R} \times f_{ER,p} \times Q \times U_v}{k_{eff}}$$

Donde k_{eff} es la velocidad de deposición efectiva e incluye la remoción atmosférica por deposición seca y húmeda de los contaminantes secundarios y la transformación química de los contaminantes primarios a secundarios (OIEA, 2006).

3.1.2 Contribución a cambio climático

Las tecnologías de generación de energía eléctrica de ciclo combinado, geotérmica, biogás y biomasa residual, generan un impacto relacionado al cambio climático derivado de la generación ó prevención de emisiones de gases de efecto invernadero.

3.1.2.1 Ciclo combinado

En relación a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se utilizaron factores de emisión aplicables al consumo de combustibles. En la tabla se presentan los valores de las emisiones de GEI los cuales fueron estimados a partir del consumo y tipo de combustibles empleados durante el año base de 2010 y mediante la aplicación de los factores de emisión del AP-42 de la US EPA para el caso del CO_2 y CH_4 mientras que para el N_2O están basados en los factores de emisión del 2006 del IPCC. Para el cálculo del CO_2 equivalente se utilizaron los valores de ponderación expresados en términos de potencial de calentamiento global (PCG) reportados por el IPCC en el 2007. Para referencia correspondiente los poderes caloríficos se utilizaron los reportados por PEMEX en el 2010. Con base en dichos valores, se obtuvieron para las diferentes centrales estudiadas los siguientes resultados de emisiones de GEI durante el 2010.

Tabla 11. Emisiones de GEI en centrales de Ciclo Combinado en el año base (2010)

Central de ciclo combinado	Combustibles	Ton CO_2 eq
El Saúz	Gas natural y Diesel ¹	2,764,744.51 ton CO_2 eq
Dos Bocas	Gas natural ²	1,254,582.72 ton CO_2 eq

¹ Turbinas

DI:IPCC (N_2O); (COV y CH_4) se consideraron relaciones referidas a los valores del FE de combustión externa.

² GN:Fire factor: 1,1451 (N_2O), (CO_2) es el mismo que combustión externa;(COV y CH_4) se calcularon relacionándolos con los FE de combustión externa.

3.1.2.2 Biogás

La generación de energía eléctrica mediante esta tecnología evita la emisión de biogás, el cual contiene metano, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el del CO₂.

De acuerdo a la metodología ACM0001 para proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) publicada por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC) por sus siglas en inglés), las siguientes emisiones de GEI deben ser consideradas en proyectos relacionados con la quema o uso de biogás en rellenos sanitarios:

Tabla 12. Emisiones de GEI a considerar en proyectos de uso de biogás en rellenos sanitarios de acuerdo a la metodología ACM0001 de la UNFCCC

	Fuente	GEI	Incluido	Justificación (MDL)	Comentarios
Línea base	Generación de energía	CO ₂	Si	Principal fuente de emisiones	Estas emisiones no son consideradas para la presente evaluación, debido a que ya han sido tomadas en cuenta en el cálculo de externalidades de cada una de las tecnologías y de esta manera se evita una doble contabilidad.
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No		
	Emisiones por la descomposición de residuos en el relleno sanitario	CO ₂	No	Las emisiones de CO ₂ por la descomposición de residuos orgánicos no se toma en cuenta debido a que también existen emisiones de CO ₂ con la actividad del proyecto	
		CH ₄	Si	Es la mayor fuente de emisiones en la línea base	
		N ₂ O	No	Las emisiones de N ₂ O son muy pequeñas en comparación con las	

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL
 APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

	Fuente	GEI	Incluido	Justificación (MDL)	Comentarios
				emisiones de metano, por lo cual no se consideran.	
	Emisiones por generación de calor	CO ₂	Si	Fuente de emisiones considerable si se toma en cuenta la generación de calor en el proyecto	No se consideran ya que no existe generación de calor en el relleno sanitario evaluado
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Emisiones por el uso de gas natural	CO ₂	No	Excluido por simplificación	No se consideran ya que no existe suministro de biogás a través de red de distribución de gas natural ni camiones
		CH ₄	Si	Fuente de emisiones considerable si el proyecto incluye el suministro de biogás a través de una red de distribución de gas natural ó el uso de camiones	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
Actividades del proyecto	Emisiones por consumo de combustibles fósiles para otros propósitos que la generación de energía eléctrica y transportación	CO ₂	Si	Puede ser una fuente importante de emisiones	Se considera el consumo de combustibles reportado en la COA
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Emisiones por consumo de electricidad	CO ₂	Si	Puede ser una fuente importante de emisiones	
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Emisiones por quema de biogás	CO ₂	No	Las emisiones son consideradas insignificantes	

	Fuente	GEI	Incluido	Justificación (MDL)	Comentarios
		CH ₄	Si	Puede ser una fuente importante de emisiones	El documento de proyecto no considera este parámetro.
		N ₂ O	No	Las emisiones son consideradas insignificantes	
	Emisiones por distribución de biogás a través de camiones	CO ₂	Si	Puede ser una fuente importante de emisiones	No se consideran, ya que no se distribuye biogás a través de camiones
		CH ₄	Si	Puede ser una fuente importante de emisiones	
		N ₂ O	No	Las emisiones son consideradas insignificantes	

De acuerdo al documento de proyecto (PDD) registrado por la UNFCCC para el proyecto 0425: Aguascalientes – Proyecto de biogás a energía EcoMethane, la cantidad de metano destruido (MD) en el escenario del proyecto se calculó usando la siguiente ecuación:

$$MD_{\text{proyecto},y} = MD_{\text{quemada},y} + MD_{\text{electricidad},y}$$

Para la cual se calculó el biogás producido usando el modelo propuesto por USEPA. La cantidad de metano destruido estimado por año es de 7,584 ton CH₄ ó 159,262 ton CO₂eq considerando que el biogás contiene metano en un 51% y una densidad de 0.0007168 tCH₄/m³CH₄. Sin embargo, se considera que en el escenario de línea base se quemarían 7,963 ton CO₂ eq por lo que la reducción neta de emisiones por captura y quema de biogás es de 151,299 ton CO₂eq en promedio por año. Asimismo, el documento de proyecto considera que las emisiones en el escenario del proyecto por consumo de energía eléctrica son en promedio de 140 ton CO₂ eq/año.

Tabla 13. Emisiones de GEI asociadas a la generación de energía eléctrica en el relleno sanitario San Nicolás

Fuente		GEI	Ton CO ₂ eq
Línea base	Emisiones por la descomposición de residuos en el relleno sanitario	CH ₄	- 151,299
Actividades del proyecto	Emisiones por consumo de combustibles fósiles para otros propósitos que la generación de energía eléctrica y transportación	CO ₂	No se reporta consumo de combustibles en la COA
	Emisiones por consumo de electricidad	CO ₂	140
TOTAL			-151,159

3.1.2.3 Biomasa residual

De acuerdo a la metodología ACM0018 para proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) publicada por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), las siguientes emisiones de GEI deben ser consideradas en proyectos relacionados con la generación de electricidad proveniente de biomasa residual:

Tabla 14. Emisiones de GEI a considerar en proyectos de generación de electricidad con biomasa residual de acuerdo a la metodología ACM0018 de la UNFCCC

	Fuente	GEI	Incluido	Justificación (MDL)	Comentarios
Línea base	Generación de energía	CO ₂	Si	Principal fuente de emisiones	Estas emisiones no son consideradas para la presente evaluación, debido a que ya han sido tomadas en cuenta en el cálculo de externalidades de cada una de las tecnologías y de esta manera se evita una doble contabilidad.
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No		
	Quema sin control	CO ₂	No	Se asume que las emisiones de CO ₂ de la	

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL
 APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

	Fuente	GEI	Incluido	Justificación (MDL)	Comentarios
	descomposición de la biomasa residual excedente			biomasa residual excedente	
		CH ₄	Si	Se pueden o no incluir dependiendo del tipo de proyecto	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
Actividades del proyecto	Consumo on-site de combustibles fósiles	CO ₂	Si	Puede ser una importante fuente de emisiones	
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Transporte y procesamiento de la biomasa residual	CO ₂	Si	Puede ser una importante fuente de emisiones	
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Combustión de biomasa residual	CO ₂	No	Se asume que las emisiones de CO ₂ por biomasa excedente no generan cambios en las reservas de carbono en el sector Uso de suelo, cambio de uso de suelo y Silvicultura (LULUCF por sus siglas en inglés)	
		CH ₄	Si	Esta fuente de emisiones debe incluirse si en la línea base se incluyen las emisiones de metano por quema no controlada o descomposición de la biomasa residual en la	

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL
 APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

	Fuente	GEI	Incluido	Justificación (MDL)	Comentarios
				línea base	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Almacenamiento de biomasa residual	CO ₂	No	Se asume que las emisiones de CO ₂ por biomasa excedente no generan cambios en las reservas de carbono en el sector LULUCF)	
		CH ₄	No	Excluido por simplificación	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	
	Agua residual del tratamiento de la biomasa residual	CO ₂	No	Se asume que las emisiones de CO ₂ por biomasa excedente no generan cambios en las reservas de carbono en el sector LULUCF)	
		CH ₄	Sí	Esta fuente de emisiones debe incluirse en casos en los que el agua es tratada (parcialmente) en condiciones anaeróbicas	
		N ₂ O	No	Excluido por simplificación	

Durante el desarrollo del presente estudio, no se encontró información disponible relativa a la línea base, es decir a las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la quema sin ó descomposición de la biomasa residual en ausencia del proyecto de generación de energía. Por lo que únicamente se consideran aquellas emisiones relacionadas a la combustión de la biomasa durante la generación de energía eléctrica.

Tabla 15 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el año base (2010)

Central	Combustibles	Ton CO ₂ eq
Ingenio Emiliano Zapata	Combustóleo y Bagazo ³	274,074.73

3.1.2.4 Geotérmica

En relación a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se utilizaron los valores de emisiones de CO₂ reportadas en la Cédula de Operación Anual del periodo 2010: **293,922 ton CO₂ eq.** De acuerdo al reporte de implementación de la metodología ExternE en los países europeos, las externalidades generadas por el ciclo de generación de energía geotérmica fueron estimadas en Portugal, y las externalidades dominantes fueron las relacionadas con impactos a cambio climático.

3.1.3 Impactos relacionados con energía eólica: impacto visual, emisiones de ruido, colisión de aves y selección del lugar

En México se cuenta con 40,268 MW⁴ de potencial de energía eólica, lo que representa más de la capacidad instalada de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Sin embargo, actualmente sólo se aprovecha el 3.2% de dicha capacidad.

En la ilustración 7 se muestran las zonas potenciales para el desarrollo de proyectos energía eólica. Los sitios más estudiados y con el mayor potencial son el Istmo de Tehuantepec y la Península de Baja California.

En 1994, se puso en marcha el primer parque eólico localizado en el ejido de La Venta, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. El parque eólico La Venta I, construido como proyecto prototipo, fue el primero en su tipo en México y en América Latina, que han operado con un factor de planta de alrededor de 40%. A finales del 2006, entró en operaciones el segundo parque eólico, La Venta II, localizado en el Istmo de Tehuantepec. Cuenta con 98 aerogeneradores de 850 kW y una capacidad total instalada de 83.3 MW.

³ El CO₂ proveniente del bagazo es parte del ciclo del carbono.
BG: IPCC tabla 2.3,

⁴ Considerando factores de producción entre 20 y 25%. Prospectiva de ER 2011-2025, SENER.

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

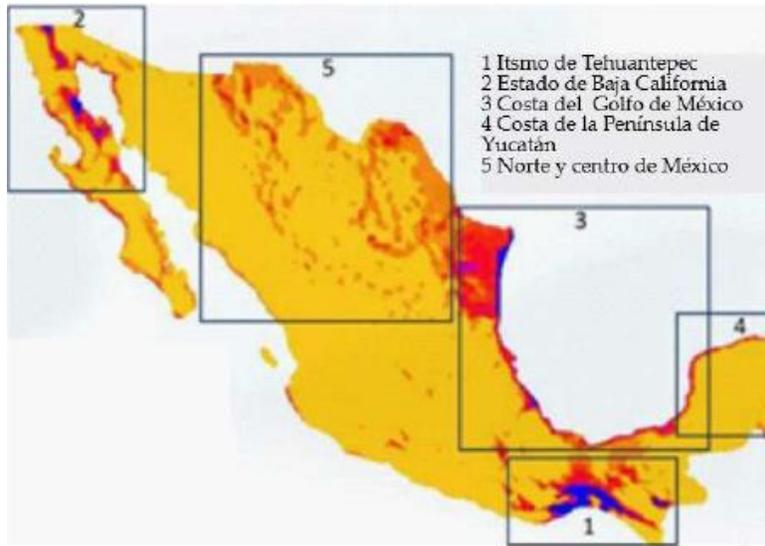


Ilustración 7. Zonas potenciales para el desarrollo de proyectos de energía eólica. Fuente: AMDEE

Los datos de caracterización de La Venta II y consideraciones de sus impactos ambientales son los siguientes:

Central Eólica La Venta II		
	Dirección	km. 15 de la Carrera Panamericana entre La Ventosa – Tapanatepec, Juchitán de Zaragoza, Oaxaca.
	Coordenadas	Latitud Norte 16° 34' 47.9" y Longitud Oeste 94° 46' 11.9"
	Tipo	Eoloeléctrica
No. de Aerogeneradores	98, marca Gamesa G52, con un diámetro del rotor 52m, altura de nariz 44 m y con una capacidad de producción de 850 kW por aerogenerador	
Fecha de Inicio de Operaciones	2006	

Impacto visual:

Es el impacto menos cuantificable y menos investigado en relación con otra clase de disturbios ambientales. El impacto visual de las instalaciones depende de criterios como el diseño de las turbinas y del parque en general, las características del paisaje circundante, las condiciones climáticas, la distancia del observador y otros factores subjetivos: un parque con pocos aerogeneradores puede llegar a ser incluso atractivo, pero una gran concentración de aerogeneradores obliga a considerar el impacto visual y la forma de disminuirlo.

Los elementos característicos de una instalación de un parque eólico que producen este tipo de impacto son: aerogeneradores, casetas, líneas eléctricas y los accesos a la instalación. Los aerogeneradores suelen minimizar su impacto mediante colores y formas atractivas.

La edificación suele posicionarse en una zona no muy visible a cierta distancia, sirviéndose de la orografía existente y empleando el cromatismo más adecuado para asemejarse a las construcciones de la zona de implantación en cuanto al color y a las formas.

Las líneas aéreas, al tener su trazado una altura menor al de los aerogeneradores disminuyen su impacto cuando son trazadas en paralelo con la alineación de éstos, debiendo enterrarse en algunos tramos cuando se separa de ellos.

Los accesos minimizan su impacto evitando al máximo posible el movimiento de tierras necesario, recuperando inmediatamente la cobertura vegetal afectada y autorizándose el paso solo al personal de explotación de las instalaciones.

Emisiones de ruido:

El origen del ruido en los aerogeneradores se debe a factores de tipo mecánico producidos por el tipo de multiplicador y generador, el ventilador del generador y los tratamientos superficiales, la calidad de los mecanizados, y factores de tipo aerodinámico producidos por la velocidad de giro del rotor, el material del que están fabricadas las palas, espacio existente entre el largo de las palas y su superficie aerodinámica, la velocidad del viento y la turbulencia del mismo. La figura 8 muestra el esquema de la propagación del ruido producido por el parque eólico; se tiene 55 dB(A) dentro del parque y valores de 50, 45, 40 y 35 dB(A) desde la zona más cercana a la más alejada (incluyendo el asentamiento urbano Santo Domingo) mostrada en el esquema (Del Campo, Edelstein, García, 2008).

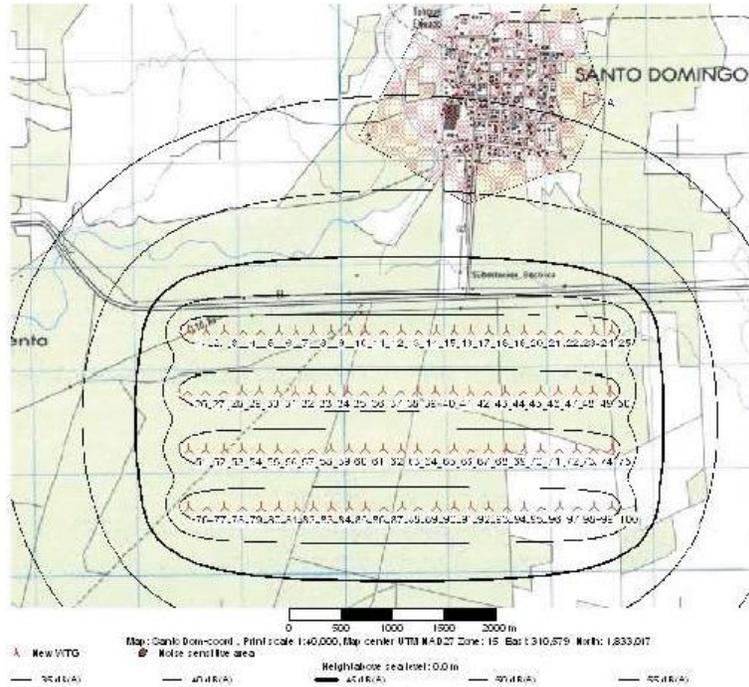


Ilustración 8. Esquema de la propagación del ruido producido por el parque eólico

En La Venta II, el nivel de ruido producido no excede los límites máximos permisibles del nivel sonoro en ponderación “A”, en un horario de 6.00 am a las 22.00 pm que son 68dB (A) y de las 22.00pm a las 6.00 am que son 65 dB (A), establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT- 1994).

Colisión de aves:

Los estudios realizados concluyen en que este impacto es muy pequeño frente al producido por causas naturales. En este sentido debe resaltarse que la mortalidad de las aves, fundamentalmente planeadoras, se produce por colisión y por electrocución, siendo esta última causa la más importante. Exceptuado las aves planeadoras, el peligro de choque en el caso de la avifauna es relativamente bajo, ya que los pájaros aprenden a evitar los obstáculos existentes en su propio territorio.

La colisión no suele producirse contra los aerogeneradores, ya que las aves se acostumbran rápidamente a ellos y a su movimiento; incluso las aves migratorias desvían su trayectoria cuando el parque eólico se encuentra en dirección de su vuelo. Este impacto se aprecia con mayor intensidad cuando la colisión se produce contra las líneas aéreas, especialmente en condiciones de baja visibilidad, debiendo minimizarse o

anularse mediante la instalación de elementos de fácil visibilidad, situados alrededor del cable (tubos de polietileno, cintas de plástico, bolas de plástico, etc.).

El peligro significativo de un parque eólico es muy pequeño en comparación con otras causas de muertes de aves, como tendidos eléctricos, carreteras, caza ilegal, etc. En un reciente estudio danés se demostró que, en lo que respecta a la colisión, una línea de turbinas de 1 Km de largo causa a las aves un daño comparable a una autovía o autopista de la misma longitud y, en determinadas circunstancias, sería un 90% menos dañina que una línea de 1 Km de alto voltaje.

Selección del lugar:

Los proyectos de parques eólicos deben pasar por un proceso de selección del lugar y de obtención del permiso y las aprobaciones necesarias para proceder a su construcción y operación.

Hay muchos grupos de personas involucrados en la determinación de la selección de un lugar para construir de un parque eólico. Es importante entender los diferentes roles, intereses y prioridades de los distintos interesados que participan en el proceso. Los principales participantes usualmente incluidos en el proceso son:

- La empresa interesada en la construcción e instalación del parque eólico.
- Gobierno (Federal, Local y municipal), con sus diferentes intereses y necesidades.
- Los grupos comunitarios, organizaciones ambientalistas y el público en general

Tabla 16. Externalidades de la generación eólica en Europa (MX\$/MWh)

Basado en: ExternE National Implementation (European Commission, 1999)

* Costos actualizados a pesos mexicanos 2013

País	Impactos durante la generación de energía que fueron monetizados	Impactos durante otras etapas del ciclo de vida que fueron monetizados	Eólica	
			Mín	Máx
Alemania	Agregados durante todo el ciclo de vida: <ul style="list-style-type: none"> • Salud pública • Salud ocupacional • Cultivos • Materiales • Ecosistemas • Impactos visuales • Ruido • Cambio climático 		10.5	12.7
Dinamarca	<ul style="list-style-type: none"> • Salud pública (accidentes) • Ruido • Impactos visuales 	Producción de materiales y manufactura: <ul style="list-style-type: none"> • Salud pública 	20.2	36.0

CUANTIFICACIÓN DE EXTERNALIDADES DE SISTEMAS QUE INVOLUCRAN EL
 APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES CONTRA SISTEMAS CONVENCIONALES (3a ETAPA).

País	Impactos durante la generación de energía que fueron monetizados	Impactos durante otras etapas del ciclo de vida que fueron monetizados	Eólica	
			Mín	Máx
		<ul style="list-style-type: none"> • Salud ocupacional • Cultivos • Materiales • Ecosistemas • Cambio climático 		
España	<ul style="list-style-type: none"> • Salud ocupacional • Ruido 	<ul style="list-style-type: none"> • Salud pública • Salud ocupacional • Cambio climático 	43.5	45.9
Grecia	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de suelo • Ruido 	<ul style="list-style-type: none"> • Salud pública • Salud ocupacional • Materiales • Cultivos • Cambio climático 	58.8	63.7
Noruega	<ul style="list-style-type: none"> • Salud ocupacional 	<ul style="list-style-type: none"> • Salud pública • Salud ocupacional • Bosques • Materiales • Cambio climático 	10.9	54.3
Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> • Salud pública • Salud ocupacional • Ruido 	<ul style="list-style-type: none"> • Acidificación • Salud ocupacional • Cambio climático 	29.7	34.3
Rango general			10.5	63.7

Los procesos de ubicación de centrales convencionales se han movido en la dirección de incrementar la participación del público en los primeros momentos del estudio. Si bien se impone una negociación adicional al hacer participar desde los comienzos al público, esto provee la oportunidad de resolver problemas antes que se tome la decisión final y se pueden reducir así los problemas ocasionados por eventuales litigios y los costos de los retrasos asociados. Esta participación no es garantía de ausencia de problemas si no hay una difusión pública significativa, o interés de parte de este, sin embargo es generalmente deseable comunicar a la población respecto del proyecto propuesto lo más temprano posible. La participación de la población provee una oportunidad, a los grupos e individuos afectados, para aprender respecto del proyecto y expresar sus opiniones.

De acuerdo al reporte de implementación de la metodología ExternE en los países europeos, las externalidades generadas por el ciclo de generación de energía eólica fueron estimadas en Alemania, España, Dinamarca, Grecia, Noruega y el Reino Unido en un rango de 10.5 a 63.7 MX\$/MWh.

3.1.4 Impactos relacionados con energía geotérmica.

A nivel mundial, México ocupa el cuarto lugar como generador de electricidad por medio de la energía geotérmica con una capacidad instalada de 958MW. Cuenta con cinco campos geotérmicos identificados, de los cuales cuatro son los campos geotérmicos que están siendo explotados en la actualidad, lo que representa el 2.1% de la capacidad eléctrica total del país operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Cabe mencionar que de todos los campos geotérmicos, la central de Cerro Prieto, Baja California representa el 75% de la capacidad geotermoeléctrica. Los campos son los siguientes:

1. Cerro Prieto, B.C., con 720 MW de capacidad.
2. Los Azufres, Mich., con 188 MW de capacidad.
3. Los Humeros, Pue., con 40 MW de capacidad.
4. Las Tres Vírgenes, B.C.S., con 10 MW de capacidad.
5. Cerritos Colorados, Jal., con un potencial estimado por la CFE en 75 MW.

En el tema de emisiones a la atmósfera no existen evidencias de afectación ambiental que indiquen la necesidad de controlar las emisiones de ácido sulfhídrico (H₂S) y amoníaco (NH₃), las cantidades totales emitidas por la Central pueden ser significativas tanto en un contexto local como regional, en este caso por la formación de sulfatos y partículas PM_{2.5}, esto debido a la reactividad fotoquímica del ácido sulfhídrico en la atmósfera.

Los datos de caracterización de los Azufres y consideraciones de sus impactos ambientales son los siguientes:

Central Geotérmica Los Azufres					
			Dirección		Agua Fría S/N, Municipio de Ciudad Hidalgo, Michoacán, C.P. 61100
			Coordenadas		Latitud Norte 19°47'25" y Longitud Oeste 100°39'56"
			Tipo		Geotermoeléctrica
No. de Unidades			Unidad	Capacidad (MW)	Año de inicio de operaciones
			1	5	1982
			2	5	1982
			3	5	1982
			4	5	1982
			5	5	1982
			6	5	1987
			7	50	1989
			8	5	1991
			9	5 Ciclo binario	1994
			10	5 Ciclo binario	1994
			11	25	2003
			12	25	2003
			13	25	2003
			14	25	2003
Emisiones Atmosféricas					
Contaminante		Tasa de emisión (ton/año)			
H ₂ S		4,174			
CO ₂		293,922			

4. Resultados

4.1 Resultados: Daños a salud por emisiones atmosféricas

Como resultado del proceso de la información suministrada al programa AIRPACTS, se obtuvieron las concentraciones de los contaminantes considerados, en cada una de las células de 5X5 km alrededor del punto de emisión, las cuales pueden ser consultadas en el Anexo 4. Posteriormente se obtuvieron los resultados de la monetización de los impactos a la salud ocasionados por las emisiones de las centrales estudiadas. En las siguientes gráficas, se puede observar el costo total de los impactos a la salud generados, también se distinguen los costos que se generan por los impactos a nivel local y por los impactos a nivel regional por cada uno de los contaminantes estudiados.

4.1.1. Central de Ciclo Combinado Dos Bocas

Para el caso de la Central Ciclo Combinado Dos Bocas, se puede observar que los costos por impactos a nivel local son de aproximadamente MX\$ 2,615,959.00, los cuales son bajos comparados con los costos obtenidos a nivel regional y son causados únicamente por la emisión de PM₁₀, mientras que a nivel regional se presentan costos por impactos por el incremento en las concentraciones de PM₁₀, nitratos y sulfatos por un costo de más de 157 millones de pesos, dando un costo total de más de 160 millones de pesos (\$160,188,646.29) durante el año 2010.

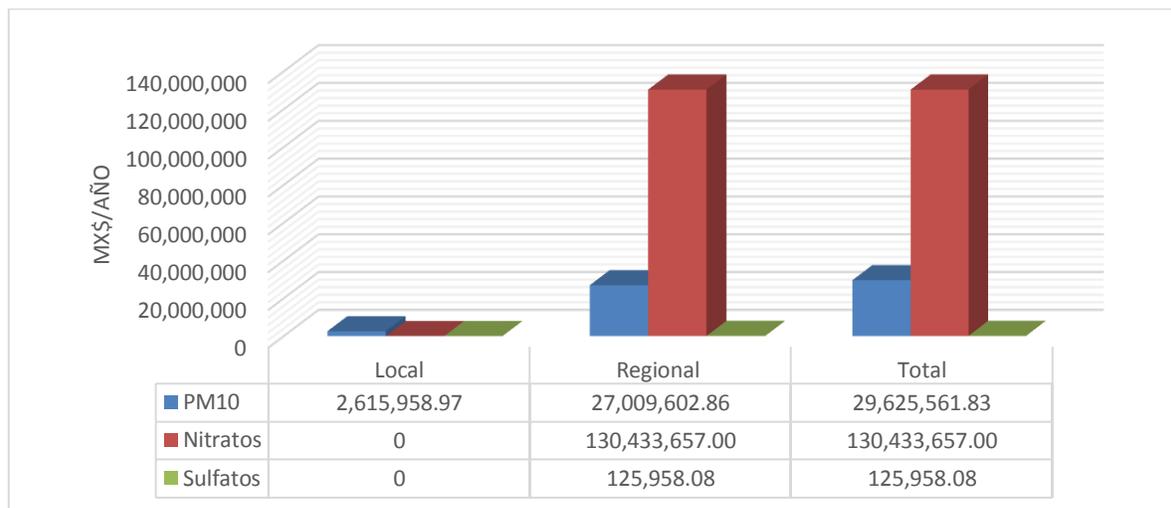


Ilustración 9. Central Ciclo Combinado Dos Bocas (Costos totales por daños a salud)

4.1.2 Central de Ciclo Combinado El Saúz

Para el caso de la Central Ciclo Combinado El Saúz, se puede observar la misma tendencia que en la planta de ciclo combinado Dos Bocas, ya que los costos por impactos

a nivel local son de aproximadamente MX\$ 9,820,254.00, los cuales son bajos comparados con los costos obtenidos a nivel regional y son causados únicamente por la emisión de PM₁₀, mientras que a nivel regional se presentan costos por impactos por el incremento en las concentraciones de PM₁₀, nitratos y sulfatos, siendo los costos por nitratos los más altos, en total los costos a nivel regional ascienden a más de 475 millones de pesos, dando un costo total de casi 485 millones de pesos (\$484,863,658.00) durante el año 2010.

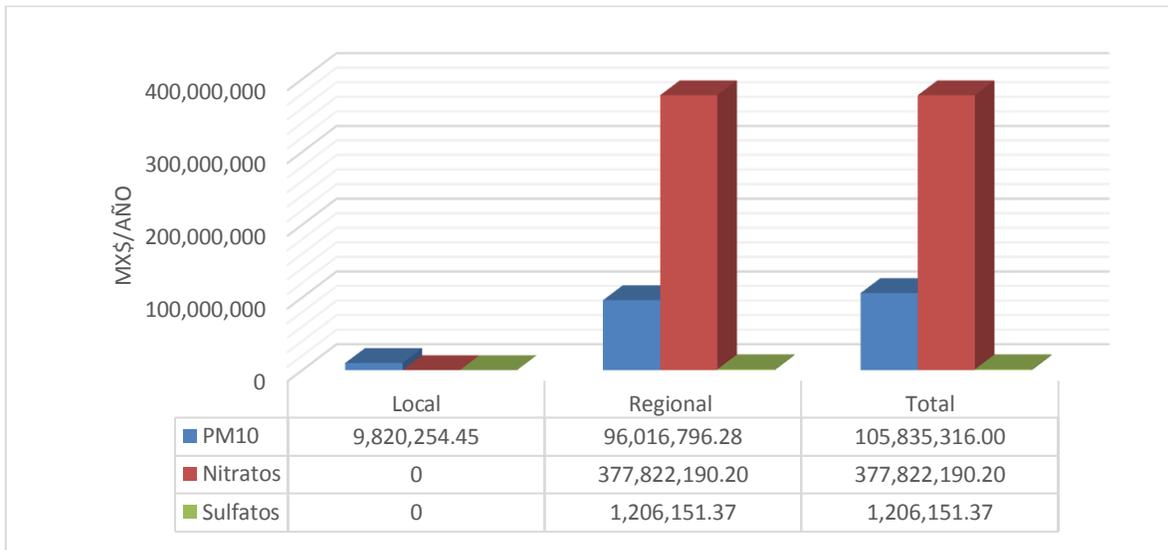


Ilustración 10. Central Ciclo Combinado El Saúz (Costos totales por daños a salud)

4.1.3 Relleno Sanitario San Nicolás

De acuerdo a la modelación realizada con el modelo SIMPACTS, los impactos a la salud por la generación de energía eléctrica en el relleno sanitario Sn. Nicolás en Aguascalientes a nivel local por PM₁₀ son mínimos, de solo un poco más de 33 mil pesos al año. Asimismo los costos estimados por daños a la salud a nivel regional son muy bajos en comparación con los obtenidos en las centrales de ciclo combinado y ascienden a poco más de 1 millón de pesos, para dar un total de MX\$ 1,338,684 durante el año 2010.

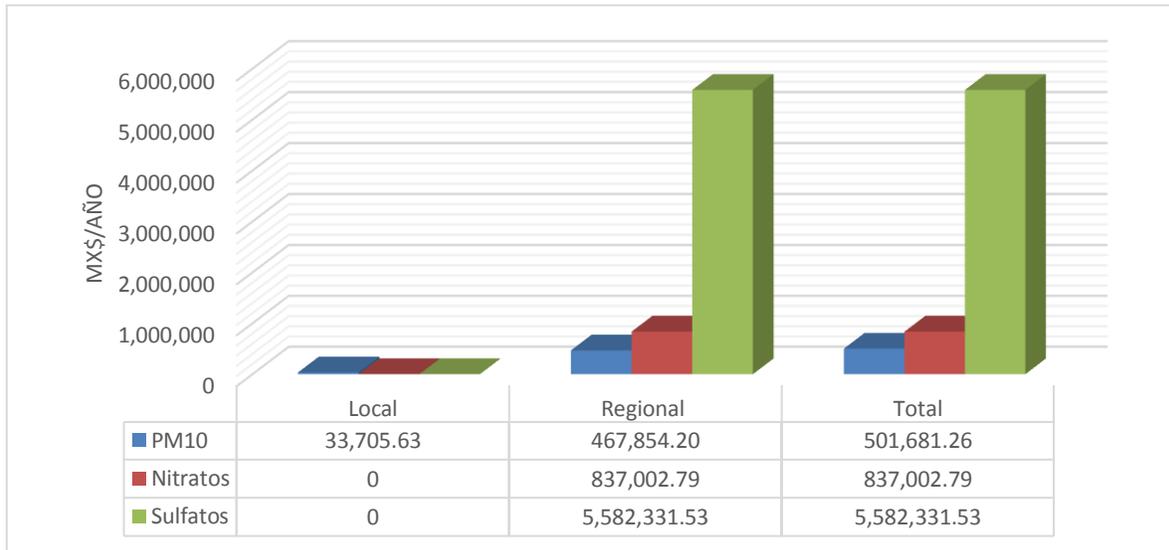


Ilustración11. Generación eléctrica en Relleno Sanitario San Nicolás
 (Costos totales por daños a salud)

4.1.4. Ingenio Emiliano Zapata

Para el Ingenio Emiliano Zapata se realizaron dos evaluaciones, la primera considera equipos de control para eliminar las partículas sólidas contenidas en los gases de combustión del bagazo, separador de partículas tipo multi-ciclónico, deshollinador tipo aspersión y dos lavadores de gases tipo Paraklon, y la segunda evaluación no considera equipo de control.

Para el caso del Ingenio Emiliano Zapata, se puede observar que los costos por impactos a nivel local son de aproximadamente MX\$ 4,974,000.00 en el escenario sin control, mientras que en el escenario con sistema de control don de MX\$538,400.00, los cuales son bajos comparados con los costos obtenidos a nivel regional y son causados únicamente por la emisión de PM10, mientras que a nivel regional se presentan costos por impactos por el incremento en las concentraciones de PM10, nitratos y sulfatos, siendo los costos por sulfatos los más altos en el escenario con control de emisiones, y por PM10 en el escenario sin control de emisiones, en total los costos ascienden a más de 1,449 millones de pesos en el escenario sin control y a 539 millones en el escenario con control durante el año 2010.

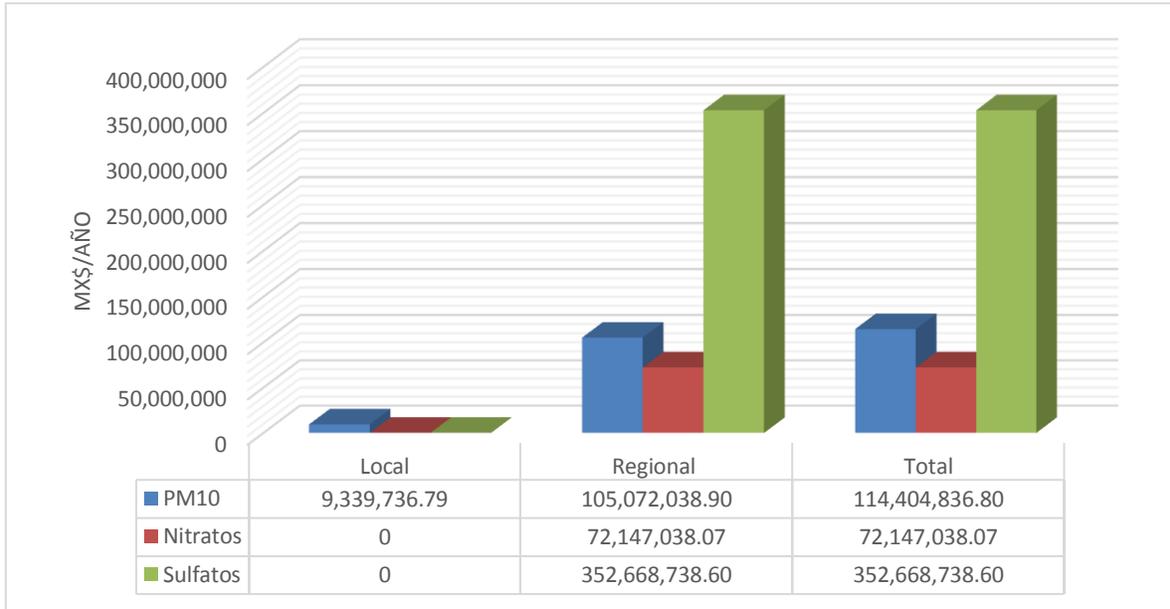


Ilustración 12. Ingenio Emiliano Zapata – con control (Costos totales por daños a salud)

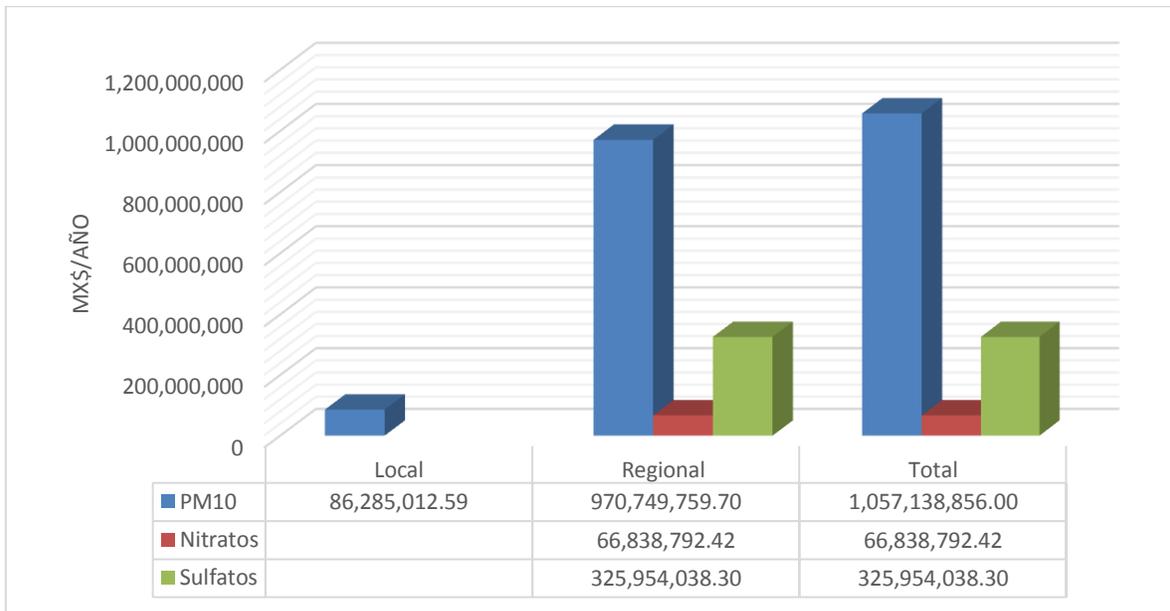


Ilustración 13. Ingenio Emiliano Zapata – sin control (Costos totales por daños a salud)

En general se observa que los impactos a nivel local tienen costos menores que a nivel regional y solo se presentan para el contaminante PM10, mientras que a nivel regional, los costos son mayores debido a la transformación química de NOx en nitratos los cuales tienen mayores efectos a la salud humana por exposición respiratoria, especialmente los sulfatos como se observó la tendencia en las centrales estudiadas. Finalmente los costos totales de daños para cada central fueron utilizados para obtener el indicador MX\$/MWh, el cual permite una mejor comparación de los efectos causados por la generación de energía eléctrica en las centrales estudiadas, como puede observarse en la siguiente tabla:

Central	Contaminante	Costo total (MX\$/año)	Costo unitario (MX\$/MWh)	Generación eléctrica 2010 (MWh)
Central de Ciclo Combinado Dos Bocas	PM10	\$29,629,031.26	\$13.62	2,175,414
	Nitratos	\$130,433,656.95	\$59.96	
	Sulfatos	\$125,958.08	\$0.06	
	TOTAL	\$160,188,646.29	\$73.64	
Central de ciclo combinado El Saúz	PM10	\$105,835,316.01	\$30.94	3,420,669.20
	Nitratos	\$377,822,190.24	\$110.45	
	Sulfatos	\$1,206,151.37	\$0.35	
	TOTAL	\$484,863,657.62	\$141.75	
Relleno Sanitario San Nicolás	PM10	\$501,681.26	\$35.83	14,000.00
	Nitratos	\$837,002.79	\$59.79	
	Sulfatos	\$582,331.53	\$41.60	
	TOTAL	\$6,921,015.58	\$137.22	
Ingenio Emiliano Zapata (con sistema de control)	PM10	\$114,404,836.76	\$2,952.18	19,376.30 ⁵
	Nitratos	\$72,147,038.07	\$1,861.73	
	Sulfatos	\$352,668,738.64	\$9,100.52	
	TOTAL	\$539,220,613.47	\$13,914.43	
Ingenio Emiliano Zapata (sin sistema de control)	PM10	\$1,057,138,855.52	\$27,279.17	19,376.30 ⁵
	Nitratos	\$66,838,792.42	\$1,724.76	
	Sulfatos	\$325,954,038.32	\$8,411.15	
	TOTAL	\$1,449,931,686.26	\$37,415.07	

Tabla 17. Costos externos totales y unitarios por central (Salud humana)

4.2 Resultados: Cambio climático por emisiones de Gases de Efecto Invernadero

En relación a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se utilizaron factores de emisión aplicables al consumo de combustibles. En la tabla C se presentan los valores de las emisiones de GEI los cuales fueron estimados a partir del consumo y tipo de combustibles empleados durante el año base de 2010 y mediante la aplicación de los factores de emisión del AP-42 de la US EPA para el caso del CO₂ y CH₄ mientras que para el N₂O están basados en los factores de emisión del 2006 del IPCC. Para el cálculo del CO₂ equivalente se utilizaron los valores de ponderación expresados en términos de potencial de calentamiento global (PCG) reportados por el IPCC en el 2007. Para referencia correspondiente los poderes caloríficos se utilizaron los reportados por PEMEX en el 2010. Con base en dichos valores, se obtuvieron para las diferentes centrales estudiadas los siguientes resultados de emisiones de GEI durante el 2010.

Tabla 18. Inventario de emisiones de GEI de las centrales estudiadas

Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero					
Año Base 2010 (Ton/año)					
Central	Combustible	CO ₂	CH ₄ (eq CO ₂)	N ₂ O(eq CO ₂)	CO ₂ eq
Ciclo Combinado Dos Bocas	Gas Natural	1,253,406.84	587.94	587.94	1,254,582.72
	Gas Natural	1,505,420.60	706.15	706.15	1,506,832.91
Ciclo Combinado El Saúz	Diesel	3,239.28	1.84	87.76	3,328.88
	Total CC	2,762,066.72	1,295.93	1,381.85	2,764,744.51
	Total RS				-151,159
Relleno Sanitario San Nicolás	Combustóleo	13,822.60	13.99	33.35	13,869.94
	Bagazo	252,437.23	3,771.47	3,996.08	260,204.78
	Total ING	266,259.83	3,785.46	4,029.44	274,074.73
C.G. Los Azufres	Total CG				293,922

Nota:

El CO₂ proveniente del bagazo es parte del ciclo del carbono

⁵ Costo de externalidades ajustado para el costo de energía

Fuente:

Turbinas

DI: IPCC (N_2O); (COV y CH_4) se consideraron relaciones referidas a los valores del FE de combustión externa.

GN: Fire factor: 1,1451 (N_2O), (CO_2) es el mismo que combustión externa; (COV y CH_4) se calcularon relacionándolos con los FE de combustión externa.

Combustión Externa

BG: IPCC tabla 2.3, other solid biomass



Ilustración 14. Tendencia en los precios de liquidación de EUA (European Union Allowances) y CER (Certificated Emissions Reductions). Basado en: (Intercontinental Exchange, 2012)

Actualmente el mercado de carbono se mantiene con una tendencia a la baja en el costo de los certificados de reducción de emisiones (CERs), que equivalen a una tonelada de emisiones de CO_2 equivalente mitigadas a través de proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), los cuales funcionan bajo el protocolo de Kioto en países no Anexo I, es decir aquellos países sin compromisos cuantificados de límites de emisiones de GEI como lo es México.

Estos costos pueden ser tomados como referencia, sin embargo debido a la falta de estabilidad de éstos, para el presente estudio se tomara un valor de referencia de USD 1.00 por tonelada de CO_2 equivalente, pudiendo ajustar este dato al valor de mercado en el momento que sea requerido.

4.3. Resultados totales de externalidades

Central	Contaminante	Costo total (MX\$/año)	Costo unitario (MX\$/MWh)	Generación eléctrica 2010 (MWh)
Central de Ciclo Combinado Dos Bocas	PM10	\$29,629,031.26	\$13.62	2,175,414
	Nitratos	\$130,433,656.95	\$59.96	
	Sulfatos	\$125,958.08	\$0.06	
	Sub-total	\$160,188,646.29	\$73.64	
	GEI	\$16,004,037.00	\$7.36	
	Total	\$266,023,962.30	\$81.00	
Central de ciclo combinado El Saúz	PM10	\$105,835,316.01	\$30.94	3,420,669.20
	Nitratos	\$377,822,190.24	\$110.45	
	Sulfatos	\$1,206,151.37	\$0.35	
	Sub-total	\$484,863,657.62	\$141.75	
	GEI	\$19,264,011.00	\$5.63	
	Total	\$485,365,338.88	\$141.79	
Relleno Sanitario San Nicolás	PM10	\$501,681.26	\$0.04	14,000,000
	Nitratos	\$837,002.79	\$0.06	
	Sulfatos	\$5,582,331.53	\$0.40	
	Sub-total	\$6,921,015.58	\$0.49	
	GEI	-\$1,928,078.00	-\$0.14	
	Total	\$4,992,937.58	\$0.35	
Ingenio Emiliano Zapata (con sistema de control)	PM10	\$114,404,836.76	\$3,028.89	37,771.20
	Nitratos	\$72,147,038.07	\$1,910.11	
	Sulfatos	\$352,668,738.64	\$9,336.97	
	Sub-total	\$539,220,613.47	\$14,275.97	
	GEI	\$3,495,905.46	\$92.55	
	Total	\$1,081,937,132.40	\$28,644.49	
Ingenio Emiliano Zapata (sin sistema de control)	PM10	\$1,057,138,855.52	\$27,987.96	37,771.20
	Nitratos	\$66,838,792.42	\$1,769.57	
	Sulfatos	\$325,954,038.32	\$8,629.70	
	Sub-total	\$1,449,931,686.26	\$38,387.23	
	GEI	\$3,495,905.46	\$92.55	
	Total	\$2,903,359,277.98	\$76,867.01	
Central eólica La Venta	Externalidades agregadas	NA	10.5 - 63.7	NA
Central geotérmica Los Azufres	GEI	\$3,749,063.00	\$2.44	1,536,501.00

5. Conclusiones

En el presente estudio se ha aplicado la metodología de estimación de externalidades en la generación de electricidad propuesta por la Unión Europea y materializada en el modelo SIMPACTS formulado por la OEIA a las siguientes Centrales:

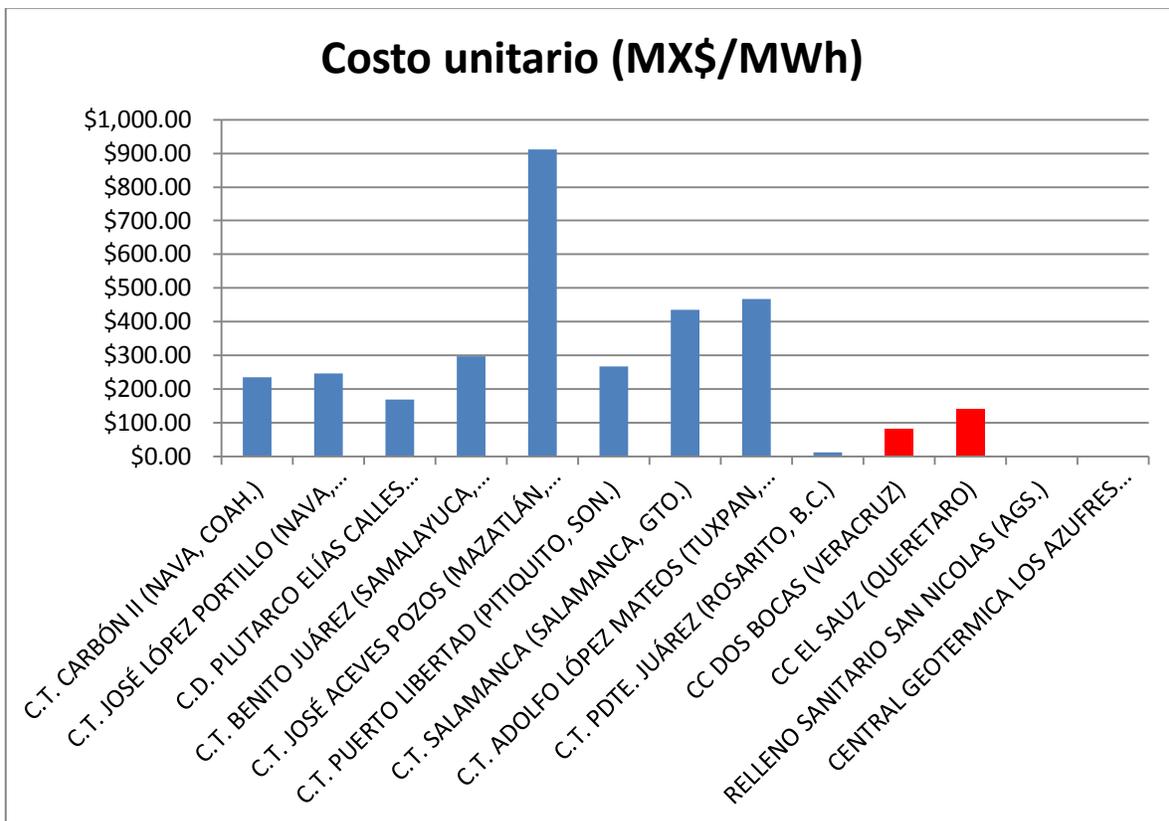
1. Central de Ciclo Combinado Dos Bocas
2. Central de Ciclo Combinado El Sauz
3. Relleno Sanitario de San Nicolás
4. Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata
5. Central geotérmica Los Azufres

Desde una perspectiva ambiental pueden considerarse 2 procesos distintos asociados a la evaluación de externalidades: por un lado los procesos de dispersión y exposición local y regional de contaminantes criterio que imponen efectos en la salud humana y, por otra parte, los efectos globales asociados al cambio climático provocado por gases de efecto invernadero. En este estudio se han estimado externalidades por ambos procesos en el año base 2010. La suma total de externalidades asociadas a las 5 centrales enlistadas, excepto la central eólica, asciende a un total aproximado de 3,663 millones de pesos mexicanos (en el caso del ingenio Emiliano Zapata se toma en cuenta el valor sin sistema de control).

Las externalidades ambientales por impactos a la salud humana de las centrales termoeléctricas en las que se evaluaron las externalidades por afectaciones a la salud humana (CC Dos Bocas, CC El Saúz, RS San Nicolás e Ing. Emiliano Zapata) representan 2,102 millones de pesos mexicanos anuales por emisiones de contaminantes criterio. Es necesario resaltar que estas cifras mantienen una incertidumbre importante – hasta en un factor de 4, siendo principalmente sensibles a variaciones en variables de dispersión y exposición-respuesta. En términos unitarios, el costo externo de las centrales por salud humana se ubica entre 0.49 y 38,387 pesos mexicanos por MWh, especialmente alto para el caso del Ingenio Emiliano Zapata considerando un escenario sin control de emisiones.

Adicionalmente se estima que las externalidades por gases de efecto invernadero representan aproximadamente 44 millones de pesos anuales mientras que en costos unitarios se encuentran en un rango de -0.14 y 92.55 pesos por MWh. Para el cálculo de las emisiones de GEI y sus externalidades asociadas a las centrales termoeléctricas estudiadas, se utilizaron factores de emisión aplicables al consumo y tipo de combustibles

empleados durante el año base de 2010 y mediante la aplicación de los factores de emisión del AP-42 de la US EPA para el caso del CO₂ y CH₄ mientras que para el N₂O están basados en los factores de emisión del 2006 del IPCC. Para el cálculo del CO₂ equivalente se utilizaron los valores de ponderación expresados en términos de potencial de calentamiento global (PCG) reportados por el IPCC en el 2007. Para referencia correspondiente los poderes caloríficos se utilizaron los reportados por PEMEX en el 2010.



Adicionalmente se compararon los resultados obtenidos en el presente estudio, con los obtenidos en la segunda etapa en la que se evaluaron centrales termoeléctricas que utilizan como combustible carbón, combustóleo y gas natural, se observa una diferencia entre estos resultados para aquellas centrales que utilizan carbón y combustóleo, sin embargo para el caso de Rosarito (gas natural), los costos son muy similares con los costos asociados a las centrales de ciclo combinado Dos Bocas y El Sauz que utilizan el mismo combustible.

De acuerdo a los resultados globales, las externalidades totales considerando impactos a cambio climático y salud humana se mantienen en un rango de 0.35 a 76,867 pesos por MWh, siendo mayores en el Ingenio Emiliano Zapata que utiliza biomasa y bajo un escenario que considera que no existen sistemas de control, cabe mencionar que durante el desarrollo del presente estudio, no se encontró información disponible relativa a la línea base, es decir a las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la quema sin ó descomposición de la biomasa residual en ausencia del proyecto de generación de energía. Por lo que únicamente se consideran aquellas emisiones relacionadas a la combustión de la biomasa durante la generación de energía eléctrica. Asimismo las externalidades más bajas son atribuidas al relleno sanitario San Nicolás, debido a la reducción de emisiones de GEI por captura del biogás generado.

Debe reconocerse que estos valores provienen de la estimación de externalidades en cada planta y que su valor promedio puede ser aplicado solo a centrales de tecnología similar –convencional- y similar perfil de tipo y consumo de combustibles (principalmente carbón, combustóleo y gas natural).

Si bien los efectos ambientales considerados en el estudio se dividen en los relacionados a efectos en la salud y los asociados al cambio climático, los valores totales representan el costo anualizado para cada una de las centrales consideradas. De acuerdo a la estimación de costos, los mayores impactos están asociados a sulfatos. Un aspecto que debe reconocerse es que a diferencia de los efectos regionales de exposición a sulfatos que representan los mayores costos de externalidades, no se consideran en el modelo SIMPACTS los efectos por exposición local a bióxido de azufre lo cual representa una oportunidad para posibles mejoras en versiones futuras del modelo.

Cabe mencionar que para el caso de la central geotérmica Los Azufres, no se tomaron en cuenta externalidades por la generación de ácido sulfhídrico debido a que no se encontraron modelos disponibles para la determinación del impacto en salud humana por la emisión de este contaminante.

En el caso de la generación de energía eólica, se considera a partir de estudios realizados en diversos países que las externalidades asociadas oscilan entre un rango de 10.5 a 63.7 pesos mexicanos por MWh generado.

Es importante resaltar que no se considera prudente usar rangos regionales ya que estos datos corresponden a centrales ubicadas en diferentes partes del país y su promedio representa valores estimados a nivel nacional. Conforme a la metodología empleada, los valores de externalidades corresponden a la situación individual de cada planta y dichos valores son sensibles a la meteorología del lugar así como a la densidad de población y a funciones exposición-respuesta de efectos en la salud. Aun con dichas limitaciones se considera que los valores promedio reportados pueden ser utilizados como valor unitario considerando las tecnologías y principales combustibles utilizados.

5.1. Limitaciones de la metodología y fuentes de información

Los resultados previos consideran los escenarios de incremento del riesgo relativo asociados a la morbilidad y pérdida de productividad. No se incluyen otros aspectos que pueden impactar el bienestar social o el medio ambiente como son las afectaciones al paisaje o a los materiales y construcciones así como al agotamiento de recursos naturales. Sin embargo, los valores estimados ofrecen una determinación consistente y comparable de las externalidades ambientales y se concluye que el método reflejado en el modelo SIMPACTS ofrece escenarios comparables y consistentes útiles a la toma de decisiones.

En relación al procedimiento de integración de datos y la conformación de archivos de entrada del modelo SIMPACTS, se pudo confirmar que existen fuentes de información consistentes para integrar los datos relacionados a población expuesta y efectos en la salud.

Los datos referentes a las características de las emisiones y sus fuentes fueron obtenidas de las cédulas de operación anual del año 2010, sin embargo estos datos fueron validados mediante la aplicación de criterios de control de calidad, como el uso de factores de emisión y visitas a sitio que permitieron validar la información obtenida.

Los datos meteorológicos fueron obtenidos a través del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y Servicio Meteorológico Nacional, corresponden a las estaciones meteorológicas más cercanas a cada una de las centrales, en algunos casos los datos del año 2010 se encontraban incompletos, por lo cual fue necesario el uso de datos de años posteriores con la finalidad de complementar la secuencia de datos y poder realizar las modelaciones necesarias.

La información estadística relativa a la distribución de la población fue generada mediante el uso de la información geográfica del Marco Geoestadístico Nacional 2010 publicado por el INEGI e información meteorológica (viento predominante), a través de sistemas de información geográfica (Arcgis), cumpliendo con lo establecido en el manual de uso del software SIMPACTS que requiere información de la distribución de la población local con una resolución de 5 por 5 km cubriendo un área de 10,000 km².

Para el cálculo de los impactos, también se utilizaron datos de incremento de radio de riesgo, los cuales fueron obtenidos del propio modelo SIMPACTS, datos de fracción de la población los cuales fueron obtenidos principalmente de la información generada por el INEGI a nivel estatal y/o nacional, y tasas de incidencia obtenidas principalmente de la información generada por la Secretaría de Salud, complementada con información de artículos científicos, de INEGI y del propio modelo SIMPACTS.

A pesar de que el estudio no incluyó un análisis de sensibilidad con base en la documentación de referencia en la aplicación de la metodología en otros países, puede afirmarse que los costos externos estimados pueden elevarse en un factor de 4 si se consideran valores máximos en los modelos de dispersión y en el incremento de riesgo relativo.

A fin de consolidar un esquema sistemático y consistente para la determinación de externalidades que pueda aplicarse en la planeación energética en los proyectos y en el despacho eléctrico, se considera necesario aun resolver aspectos de control de calidad en datos de monitoreo y reporte de emisiones así como de información de incidencia de variables de morbilidad y mortalidad.

Asimismo será necesario complementar la evaluación de las externalidades de la generación de energía eléctrica mediante otras tecnologías como hidroeléctricas y nuclear con la finalidad de contar con información sistemática que permita la comparación de las diferentes tecnologías disponibles para una mejor toma de decisiones con respecto al desarrollo de la matriz energética del país.

6. Lista de Anexos

Anexo 1. Información meteorológica

Anexo 2. Tasas de incidencia y fracción de la población afectada por FER

Anexo 3. Distribución de la población

Anexo 4. Resultados de la modelación de la dispersión atmosférica de los contaminantes

Anexo 5. Resultados de la estimación de costo de daños

Anexo 6. Memoria técnica de visitas a centrales termoeléctricas

7. Bibliografía

Alcoer, S. (2011). Política energética e innovación tecnológica. XXVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Ciudad de México: <http://www.slideshare.net/CICMoficial/21-sergio-alcoer-cicm-mesa-energia1>.

CEPAL. (2004). Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México. México.

CFE. (15 de September de 2012). Centrales generadoras. Recuperado el 8 de Agosto de 2013, de http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/Centrales-generadoras.aspx.

Dimitrijevic, Z., Tatic, K., Knezevic, A., & Salihbegovic, I. (2011). External costs from coal-fired thermal plants and sulphur dioxide emission limit values for new plants in Bosnia and Herzegovina. *Energy Policy* , 3036-3041.

European Commission. (17 de Mayo de 2011). EcoSenseWeb. Recuperado el 20 de Juio de 2013, de <http://ecosenseweb.ier.uni-stuttgart.de/>

European Commission. (2005). ExternE Externalities of energy: Methodology 2005 update. Luxemburgo: European communities.

European Commission. (1999). ExternE Vol. X National Implementation.

Fouquet, R. (2011). Long run trends in energy-related external costs. *Ecological economics* , 2380-2389.

Grupo de trabajo de metodología de externalidades. (Abril de 2012). Metodología de externalidades. Presentación. Ciudad de México.

Hainoum, A., Almoustafa, A., & Seif Aldin, M. (2010). Estimating the health damage costs of syrian electricity generation. *Energy* , 628-638.

INEGI. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Recuperado el 15 de Noviembre de 2012, de <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=17484>

Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. (2004). User's manual Ecosense 4.0. Stuttgart.

Intercontinental Exchange. (Noviembre de 2012). ICE Monthly Utility Report: November 2012. Obtenido de https://www.theice.com/publicdocs/futures/ICE_Monthly_Utility_Report.pdf

Krewitt, W. (2002). External costs of energy - do the answers match the questions? Looking back at 10 years of ExternE. Energy policy , 839-848.

Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica. (9 de abril de 2012). Diario Oficial de la Federación .

Ley General de Cambio Climático. (6 de junio de 2012). Diario Oficial de la Federación.

Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. (12 de enero de 2012). Diario Oficial de la Federación.

OIEA. (2006). SIMPACTS Manual.

Owen, A. D. (2006). Renewable energy: Externality costs as market barriers. Energy policy , 632-642.

Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. (2 de septiembre de 2009). Diario Oficial de la Federación .

Roa Castro, F. M., Toral Freyre, S., Roa Castro, V. H., Zavala Habib, J. A., Durán de Alba, L. M., Herrera Amaro, B. P., y otros. (2009). Estimaciones sobre la tendencia del asma en México 2008-2012. Medigraphic , 16-22.

Rolfe, J. (2003). Environmental economics. Rockhampton, Qld. Australia: Central Queensland University.

SEMARNAT. (2009). Estudio para la cuantificación de externalidades de sistemas que involucran el aprovechamiento de energías renovables contra sistemas convencionales. México.

SENER. (2012). Estrategia nacional de energía 2012-2026. México.

SENER. (2011). Estrategia Nacional para la transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía. México.

SENER. (2009). Programa especial para el aprovechamiento de energías renovables. México.

SENER. (2010). Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025. México.

SENER. (27 de Septiembre de 2012). Sistema de información energética. Recuperado el 27 de Septiembre de 2012, de <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController?action=login>

SS. (2009). Anuario de morbilidad 2009.

Sundqvist, T. (2004). What causes the disparity of electricity externality estimate? Energy policy (32), 1753-1766.

Vargas Becerra, M. H. (2009). Epidemiología del asma. Medigraphic , 91-97.

www.mledprogram.org



USAID | **MÉXICO**
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA